



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Universidad
Politécnica
de Cartagena

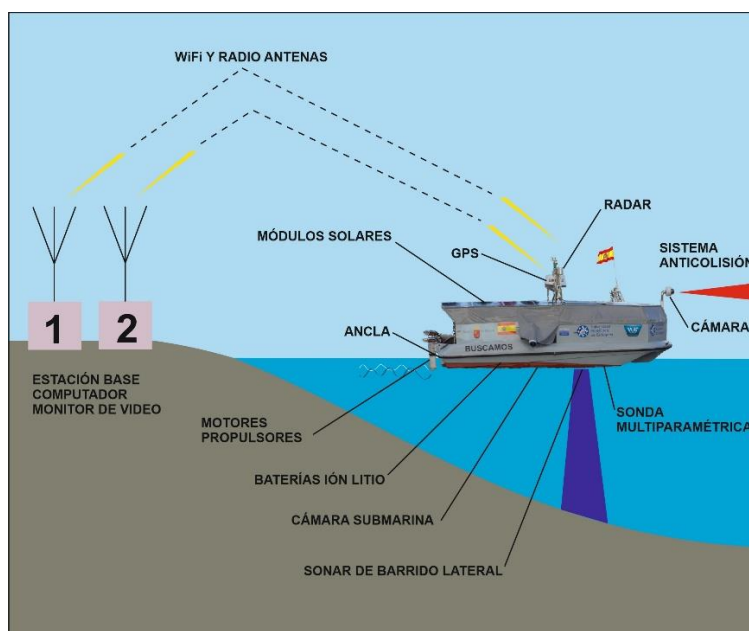
Campus
de Excelencia
Internacional



Escuela
Internacional
de Doctorado

Arquitectura de Control para Vehículos Solares Autónomos de Superficie para Aguas Someras en Misiones de Larga Duración.

Programa de Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética



Autor: Inocencio González Reolid

Director: Dr. Francisco José Ortiz Zaragoza

Co-Director: Dr. Antonio Guerrero González

Cartagena, 2021



Universidad Politécnica de Cartagena

Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica
y Tecnología Electrónica

Arquitectura de Control para Vehículos Solares Autónomos de Superficie para Aguas Someras en Misiones de Larga Duración

TESIS DOCTORAL

Inocencio González Reolid

2021



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica
y Tecnología Electrónica

**Arquitectura de Control para Vehículos Solares
Autónomos de Superficie para Aguas
Someras en Misiones de Larga Duración**

TESIS DOCTORAL

Inocencio González Reolid

Director

Dr. Francisco José Ortiz Zaragoza

Co-Director

Dr. Antonio Guerrero González

2021

Dedicatorias

A mis Padres:

Por enseñarme los valores, la responsabilidad y
la constancia en el gran viaje de la vida.

A mi Hijo:

Por su ejemplo de lealtad y dedicación.

A Gema Esparcia:

Por su inteligencia y apoyo incondicional.

A mis Hermanos:

Por su generosidad, apoyo, paciencia y ánimos.

Al Dr. Francisco J. Ortiz Zaragoza:

Por su asesoramiento en el desarrollo de esta tesis doctoral y
por el tiempo dedicado a la presente.

Al Dr. Antonio Guerrero:

Por sus conocimientos, experiencia y paciencia aportados a esta tesis doctoral.

A Ester y Marta Esparcia:

Por ser buenas estudiantes y buenas personas.

A mis amigos y compañeros:

Francisco Aracil, Bienvenido, Nápoli, Verdú y Sergio.

Agradecimientos

Universidad Politécnica de Cartagena

Universidad de León

Al Dr. Antonio Urbina:

Por su valiosa asesoría aportada a esta tesis doctoral.

Al Dr. Ángel Pérez Ruzafa:

Por su asesoramiento y apoyo.

Al Dr. Luis de Garrido:

Por inspirarme en el campo de las Energías Renovables.

A D. Juan Carlos Molina Molina:

Por los apoyos en IUNO y las operativas.

A D. Juan José Martínez López:

Por su amistad y apoyo.

RESUMEN

Los mares del mundo son un recurso valioso, así como un elemento clave en la ecología y sostenibilidad del medio ambiente, que necesitan protección como una fuente importante de alimentos, riqueza y vida. El manejo exitoso de los recursos marinos se consigue mediante el monitoreo de los parámetros físico-químicos relacionados con la calidad del agua, como la salinidad, la temperatura, el oxígeno disuelto, los nitratos, los fosfatos, la densidad, el pH y los niveles de clorofila, entre otros.

Para monitorizar correctamente los parámetros de la calidad del agua del medio marino, se propone en esta tesis una arquitectura de control para un vehículo autónomo de superficie ASV para realizar misiones de larga duración que se puede anclar sobre fondos someros y comportarse como boya fija para optimizar la energía de la misión, lo que se ha llamado en esta tesis comportamiento híbrido ASV-Boya. Este vehículo se autoabastece con energía solar fotovoltaica e incorpora sistemas de detección especializados para medir la calidad del agua. A este sistema robótico conjunto se la ha llamado observatorio oceanográfico robótico. El sistema es una combinación de vehículo autónomo y boya fija, cuya energía y autonomía de navegación se gestionan gracias a una arquitectura de software capaz de tomar decisiones de forma inteligente y autónoma. Esta embarcación altamente especializada es novedosa porque tiene la capacidad de anclarse al lecho marino y convertirse en una “boyas”, ya sea para tomar medidas en puntos específicos o para recargar sus baterías y navegar explorando una determinada área tomando muestras del entorno. La arquitectura de control diseñada es de tipo híbrida, que combina una capa deliberativa dividida en dos niveles, el Nivel Estratégico y el Nivel Táctico, que son los que toman las decisiones y una capa reactiva, el Nivel Operativo, donde se ejecutan los comportamientos reactivos.

De los estudios de los vehículos autónomos que han sido descritos en la literatura, como los vehículos operados a distancia (ROV), los vehículos autónomos subacuáticos (AUV) y los vehículos autónomos de superficie (ASV), todos tienen una autonomía de suministro energético limitada, debido a la capacidad de sus baterías, por tanto, el área que pueden cubrir también lo es. No disponen de sistemas de producción y gestión inteligente de su energía, que permitan optimizar su empleo en misiones de larga duración, y planificar adecuadamente las zonas a monitorear.

Este ASV-Boya proporciona una solución novedosa y logra una presencia autónoma permanente en lagos o aguas costeras poco profundas. Esto mejora la autonomía en el monitoreo de los parámetros de calidad del agua y evita los problemas asociados con el despliegue de un gran número de sistemas de observación marina basados en boyas fijas, que influyen y afectan al tráfico marítimo, al medio ambiente, al turismo y el costo involucrado.

Todas las operaciones de la embarcación son gestionadas por la arquitectura de control implementada en el vehículo. El sistema de toma de decisiones calcula la ruta a la siguiente área que se explorará teniendo en cuenta una serie de parámetros, que incluyen: la posición del vehículo, los parámetros físico-

químicos del agua, la distancia a la siguiente área de exploración, la radiación solar, la energía disponible en sus baterías, la velocidad del viento y dirección, corrientes de agua, etc.

La tesis contempla el diseño y simulación del modelo de arquitectura de control mediante el software Matlab/Simulink, para verificar la viabilidad del mismo, introduciendo datos similares a los obtenidos en el mundo real.

Se propone una estrategia de clasificación de zonas georreferenciadas de exploración que facilitan la toma de decisiones en la viabilidad de la ruta de exploración. Para ello se divide la zona de exploración (en esta tesis el Mar Menor) en cuadrículas georreferenciadas, estableciendo una base de datos de las coordenadas de cada zona, al objeto de tener claramente diferenciados y ordenados los valores de los parámetros físico-químicos de cada zona, cuando se realizan las exploraciones.

También se describe una misión de monitoreo permanente en el Mar Menor, con una combinación de energía solar y una estrategia de toma de decisiones con respecto a la ruta óptima a seguir. Al final se incluyen los resultados de la simulación de la misión y de la energía, así como una descripción de las misiones de monitoreo reales obtenidas en el experimento realizado.

Se propone para futuras investigaciones el despliegue de varios de estos robots para explorar una determinada zona marina.

ABSTRACT

The world's seas are a valuable resource, as well as a key element in the ecology and sustainability of the environment, needing protection as an important source of food, wealth and life. The successful management of marine resources is achieved by monitoring the physical-chemical parameters related to water quality, such as salinity, temperature, dissolved oxygen, nitrates, phosphates, density, pH and levels. chlorophyll, among others.

To correctly monitor the parameters of the water quality of the marine environment, a control architecture for an autonomous surface vehicle ASV is proposed in this thesis to carry out long-duration missions that can be anchored on shallow waters and behave as a fixed buoy to optimize the energy of the mission, what has been called in this thesis hybrid behavior ASV-Buoy. This vehicle is self-sufficient with photovoltaic solar energy and incorporates specialized detection systems to measure water quality. This joint robotic system has been called the robotic oceanographic observatory. The system is a combination of an autonomous vehicle and a fixed buoy, whose energy and navigation autonomy are managed thanks to a software architecture capable of making intelligent and autonomous decisions. This highly specialized vessel is novel because it has the ability to anchor itself to the seabed and become a "buoy", either to take measurements at specific points or to recharge its batteries and navigate exploring a certain area taking samples of the environment. The control architecture designed is of a hybrid type, which combines a deliberative layer divided into two levels, the Strategic Level and the Tactical Level, which are the decision-makers, and a reactive layer, the Operational Level, where reactive behaviors are executed.

Of the studies of autonomous vehicles that have been described in the literature, such as remotely operated vehicles (ROV), autonomous underwater vehicles (AUV) and autonomous surface vehicles (ASV), all have limited autonomy of energy supply. Due to the capacity of their batteries, therefore, the area that they can cover is also important. They do not have systems for the production and intelligent management of their energy, which make it possible to optimize their use in long-term missions, and to adequately plan the areas to be monitored.

This ASV-Buoy provides a novel solution and achieves a permanent autonomous presence in lakes or shallow coastal waters. This improves autonomy in the monitoring of water quality parameters and avoids the problems associated with the deployment of a large number of marine observation systems based on fixed buoys, which influence and affect maritime traffic, the environment, tourism. and the cost involved.

All vessel operations are managed by the control architecture implemented in the vehicle. The decision-making system calculates the route to the next area to be explored taking into account a series of parameters, including: the position of the vehicle, the physico-chemical parameters of the water, the distance to the next exploration area, the solar radiation, the energy available in its batteries, wind speed and direction, water currents, etc.

The thesis contemplates the design and simulation of the control architecture model using Matlab / Simulink software, to verify its viability, introducing data similar to those obtained in the real world.

A strategy for classifying georeferenced exploration zones is proposed to facilitate decision-making on the viability of the exploration route. For this purpose, the exploration area (in this thesis the Mar Menor) is divided into georeferenced grids, establishing a database of the coordinates of each area, in order to have clearly differentiated and ordered the values of the physical-chemical parameters of each area, when the scans are carried out.

A permanent monitoring mission in the Mar Menor is also described, with a combination of photovoltaic harvesting solar-power and a decision-making strategy regarding the optimal route to follow. At the end, the results of the mission and energy simulation are included, as well as a description of the actual monitoring missions obtained in the experiment carried out.

The deployment of several of these robots to explore a certain marine area is proposed for future research.

ÍNDICE

Capítulo 1 Introducción. Motivaciones de la tesis

1.1	Introducción.....	1
1.1.1	Los mares, fuente de alimentos, riqueza y vida.....	1
1.1.2	Necesidad de monitorear el medio marino. Caso particular del Mar Menor.	3
1.2	Motivaciones de la tesis.....	7
1.2.1	Problemática y limitaciones para monitorear el medio marino	7
1.3	Soluciones para misiones autónomas de larga duración en aguas poco profundas.....	10
1.4	Objetivos y aportaciones de la tesis.	15
1.4.1	Objetivos generales.....	15
1.4.2	Aportaciones de la tesis.	17
1.5	Estructura del documento de tesis.	18

Capítulo 2 Estado del arte

2.1	Introducción.....	19
2.2	Soluciones de Monitoreo Estático: Boyas y Redes de Sensores.....	19
2.3	Soluciones de Monitoreo Dinámico Autónomo: Vehículos Marinos de Superficie y Submarinos	26
2.4	Conclusiones del estudio del estado del arte.	38

Capítulo 3 Diseño de una arquitectura de control para ASVs-Boya en misiones de larga duración

3.1	Introducción.....	39
3.2	Estructura jerárquica por capas de la arquitectura.	42
3.3	Descripción funcional de módulos de la Arquitectura.	44
3.3.1	Nivel Estratégico.	45

3.3.1.1	Subsistema Gestor de Misión.	45
3.3.1.1.1	Planificador Misión.	45
3.3.1.1.2	Base Datos.	46
3.3.1.2	Subsistema Gestor Estratégico.	47
3.3.1.2.1	Planificador Estratégico.	47
3.3.1.2.2	Reglas.	48
3.3.2	Nivel Táctico.	48
3.3.2.1	Subsistema Gestor de Ejecución.	48
3.3.2.1.1	Coordinador y Gestor Energético.	48
3.3.2.1.2	Comportamientos.	49
3.3.2.2	Subsistema Gestor de Táctico.	49
3.3.2.2.1	Planificador Táctico.	50
3.3.2.2.2	Reglas.	50
3.3.3	Nivel Operativo.	50
3.3.3.1	Subsistema de Navegación.	51
3.3.3.1.1	Navegación Global.	51
3.3.3.1.2	Control.	51
3.3.3.2	Subsistema Percepción.	51
3.3.3.2.1	Sensores y Sondas.	51
3.3.3.2.2	Detección de Obstáculos.	52
3.3.3.2.3	Energía.	52
3.4	Comportamiento de la arquitectura en la ejecución de una misión autónoma de exploración.	52

Capítulo 4 Modelo de arquitectura de control

4.1	Introducción.	57
4.2	Arquitectura de control.	58
4.3	Descripción del Nivel Estratégico.	61

4.4	Descripción del Nivel Táctico.	64
4.5	Descripción del Nivel Operativo.....	65
4.6	Diagrama de flujo del comportamiento del modelo de Arquitectura de Control.....	67
4.7	Clasificación de la zona a explorar en casillas.	69
4.8	Estrategia de clasificación de las áreas de interés.	70
4.9	Modelo de Arquitectura de Control implementado en Matlab.....	74
4.9.1	Nivel Estratégico.	75
4.9.1.1	Implementación del Sistema Sensores en Lógica Difusa.	78
4.9.1.2	Gráficas obtenidas en la simulación para el módulo “Fusión Sensores”.	85
4.9.1.3	Implementación del módulo “Planificador Estratégico”.	89
4.9.2	Nivel Táctico.	93
4.9.2.1	Implementación del Gestor Táctico.....	95
4.10	Resultados de la simulación y conclusiones.....	100
4.10.1	Resultados de la simulación.	100
4.10.2	Conclusiones.....	104

Capítulo 5 Plataforma robótica ASV-Boya

5.1	Introducción.....	106
5.2	Plataforma robótica ASV-Boya utilizada para pruebas.....	106
5.3	Hardware del ASV-Boya.	108
5.4	Software del ASV-Boya.....	110
5.5	Estación de comando, control, comunicación y computación: IUNO.	114
5.6	Sistema de gestión de energía.	115
5.6.1	Esquema unifilar.....	118
5.6.2	Diseño del sistema eléctrico.	119
5.6.3	Módulos solares.....	121
5.6.4	Sistema de almacenamiento. Baterías.	122

5.6.5	Sistema de propulsión. Motores fuera borda.	123
5.6.6	Reguladores de carga.	124
5.6.7	Reguladores de 24 V/15 V y 24 V/5 V.	126
5.6.8	Sensores de energía.	126
5.6.9	Mando del control de la velocidad.	126
5.7	Generación energética.	127
5.8	Pérdidas.	128
5.9	Balance energético total.	129
5.10	Conclusiones.	130

Capítulo 6 Pruebas experimentales y análisis de resultados

6.1	Introducción.	132
6.2	Análisis de resultados obtenidos.	140

Capítulo 7 Conclusiones y trabajos futuros

7.1	Conclusiones.	144
7.2	Aportaciones de esta tesis.	146
7.3	Trabajos y líneas de investigación futuras.	151

Capítulo 8 Referencias

8.1	Referencias.	152
------------	--------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Situación del Mar Menor en el litoral español. Imagen tomada de Google Earth.	4
Figura 1.2: Evolución de la <i>clorofila a</i> en la columna de agua del Mar Menor entre 1998 y 2017. La línea azul muestra la evolución obtenida a partir del análisis espectral de imágenes de satélite. Los puntos y líneas rojas son valores de clorofila obtenidos directamente a partir de muestras de agua analizadas por espectrofotometría. Imagen tomada de Belando et al (2019).	5
Figura 1.3: Estructura general de redes de sensores inalámbricos aéreos para el monitoreo oceanográfico. Imagen tomada de [13].	8
Figura 1.4: El Observatorio Robótico BUSCAMOS (BUSCAMOS-RobObs) navegando en el Mar Menor.	13
Figura 1.5: Arquitectura básica multicapa.	16
Figura 2.1: Características de boya marina y tipo de nodo (ZigBee/GPRS). Imagen tomada de [20].	20
Figura 2.2: Configuraciones más representativas de las boyas utilizadas en A-WSNs. Imagen tomada de [22].	21
Figura 2.3: Arquitectura general de un nodo sensor oceanográfico. Imagen tomada de [23].	22
Figura 2.4: Boya multisensor y flotador con sensores. Imagen toma de [25].	23
Figura 2.5: Boya sensor Gateway y arquitectura de la misma. Imagen tomada de [26].	24
Figura 2.6: Consumo de la boya en cada instante según su estado. Imagen tomada de [27]. ...	25
Figura 2.7: Partes del Wave Glider. Imagen tomada de [30].	27
Figura 2.8: Partes del SAUV II. Imagen tomada de [33].	29
Figura 2.9: Catamarán SCOAP. Imagen tomada de [34].	30
Figura 2.10: EL USV C-Enduro. Imagen tomada de [35].	31
Figura 2.11: El ASV Lake Wivenhoe. Imagen tomada de [37].	32
Figura 2.12: Fotografía del MicroVeGA. Imagen tomada de [38].	32

Figura 2.13: Sistema BUSCAMOS-Oil compuesto por un ASV y un UUV. Imagen tomada de [16].	34
Figura 2.14: Varios ASV realizando una exploración en un lago de interior. Imagen tomada de [40].	34
Figura 2.15: Fotografía del ASV CatOne. Imagen tomada de [41].	36
Figura 2.16: Fotografía del ASV Roboat. Imagen tomada de [42].	37
Figura 2.17: Fotografía del ASV CatOne. Imagen tomada de [43].	37
Figura 3.1: Esquema general.	39
Figura 3.2: Estructura jerárquica de la arquitectura de control, mostrando los tres niveles de control: Estratégico, Táctico y Operativo.	42
Figura 3.3: Diseño por bloques de la Arquitectura de Control. El flujo de la información y/o de datos se expresa por líneas discontinuas azules, las órdenes y/o comandos se representan por líneas sólidas negras y el sentido por la dirección de las flechas.	45
Figura 3.4: División del Mar Menor en casillas de 1 Km de lado con la numeración de cada una. Se representan las coordenadas UTM de X e Y.	46
Figura 3.5: Imagen de IUNO, Interface for Underwater drOne, usado para introducir valores por un operario y enviar información a la embarcación ASV-Boya [52], donde se puede ver la trayectoria seguida en la exploración de una casilla.	53
Figura 3.6: Bucles de control formados durante el funcionamiento de la Arquitectura de Control.	56
Figura 4.1: Esquema de bloques del modelo de Arquitectura de Control instanciado para el vehículo ASV-Boya.	59
Figura 4.2: Sistema IUNO [52].	60
Figura 4.3: Subsistemas y módulos del “Nivel Estratégico”.	61
Figura 4.4: Subsistema “Gestor de Misión” y sus módulos internos.	62
Figura 4.5: Subsistema “Gestor Estratégico” y sus módulos internos.	63

Figura 4.6: Subsistemas y módulos del “Nivel Táctico”.....	64
Figura 4.7: Subsistemas y módulos del “Nivel Operativo”.....	65
Figura 4.8: Diagrama de flujo de la Arquitectura de Control.....	68
Figura 4.9: Zona del experimento dividida en 25 casillas con fines de exploración.....	69
Figura 4.10: Valores teóricos de la Temperatura utilizados para la simulación.	71
Figura 4.11: Valores teóricos de la Salinidad utilizados para la simulación.....	72
Figura 4.12: Valores teóricos de la Densidad utilizados para la simulación.....	72
Figura 4.13: Valores teóricos del Oxígeno utilizados para la simulación.	73
Figura 4.14: Valores teóricos de la Clorofila utilizados para la simulación.....	73
Figura 4.15: Valores teóricos de Nitratos utilizados para la simulación.	74
Figura 4.16: Modelo de “Gestor Estratégico” de toma de decisiones realizado en Simulink/Matlab. Este modelo creado permite mediante su simulación verificar el correcto funcionamiento del mismo.	75
Figura 4.17: Sistema difuso implementado en el Fuzzy Logic Designer: “Fusión Sensores” de Matlab, donde se aprecian las 6 entradas de las señales de los sensores y una salida.	78
Figura 4.18: Forma triangular y singletón.	79
Figura 4.19: Funciones de membresía para cada uno de los seis sensores, Temperatura, Salinidad, Densidad, Oxígeno, Clorofila y Nitratos.	81
Figura 4.20: Función de pertenencia de salida para clasificar las casillas según los valores de los sensores.	82
Figura 4.21: Colores del estado de cada casilla del área a explorar.	83
Figura 4.22: Gráficas donde se aprecia la evolución de los valores de la salida del sistema “Fusión Sensores” normalizadas entre 0 y 1, respecto de cada uno de los valores de las señales de entrada de los 6 sensores.....	86
Figura 4.23: Gráficas de mallas de superficie en 3D de la evolución de la salida respecto a las entradas de los valores de los sensores.....	87
Figura 4.24: Fichero ejecutable creado en Matlab para enviar los valores de salida del Modelo creado en Simulink de cada una de las 25 casillas al fichero Excel (datos_SimulacionesV2.xls) y crear una tabla.....	88

Figura 4.25: Fuzzy Inference System (FIS) con las entradas y la salida.....	89
Figura 4.26: Membresías de entrada, en a) Membresía de la señal de los sensores, b) Membresía de la distancia y en c) Membresía del tiempo.....	91
Figura 4.27: Membresía de salida realizado en Matlab.....	92
Figura 4.28: Gráficas de superficie en 3D de la evolución de las señales de salida respecto a las señales de entrada, del “Planificador Estratégico”.	92
Figura 4.29: Gráfica de superficie de la señal de los sensores respeto al tiempo, vista de plano.	92
Figura 4.30: Modelo del “Gestor de Ejecución” realizado en Simulink/Matlab.....	94
Figura 4.31: Fis Editor, “Gestor Táctico” conteniendo las entradas, salidas y el “Planificador Táctico”	95
Figura 4.32: Membresías de entrada, a) Membresía de la batería, b) Membresía del Generador Solar y en c) Membresía de la Climatología.....	97
Figura 4.33: Membresía de salida de las tres variables.	99
Figura 4.34: Gráficas obtenidas en el Scope “Fuzzy_Táctico” de los valores introducidos en el generador de señales “Signal Builder” al objeto de permitir realizar la simulación semejante al mundo real.	100
Figura 4.35: Resultado de simular el modelo del “Gestor de Ejecución”, con el comportamiento de “Ir de A a B”. Se trata de ir de la casilla 1 a la casilla 8, que se encuentra a 2.236 m, con un ángulo del trazado de la trayectoria de 26,57 °C, a una velocidad de 2 m/s.	101
Figura 4.36: Gráficas obtenidas en el Scope “Fuzzy_Táctico” de los valores de salida del módulo “Planificador Táctico”, se aprecia la variación del comportamiento, de la velocidad y amplitud del ASV-Boya, según los valores de entrada.	101
Figura 4.37: Gráficas obtenidas en el Scope “Gráficas Comportamientos” de los valores de salida del submodelo “Coordinador y Gestor Energético”, se aprecian los tres modos de comportamiento que puede realizar el ASV-Boya.....	102
Figura 4.38: Resultado de la simulación del modelo, se obtiene en la salida la decisión de “Exploración”.	103
Figura 4.39: Resultado de la simulación del modelo, se obtiene en la salida la decisión de “Echar Ancla”.	104

Figura 5.1: Arquitectura básica multicapa propuesta [55].	106
Figura 5.2: Fotografías de la embarcación ASV-Boya, usada para realizar el experimento [55].	107
Figura 5.3: Vistas del diseño en 3D de la embarcación realizado en SolidWorks, usada para realizar los experimentos.	108
Figura 5.4: Componentes de hardware ASV-Boya y redes de comunicación [55].	109
Figura 5.5: Esquema de bloques y Algoritmos del Software utilizado en la embarcación [55].	111
Figura 5.6: Arquitectura de Control presentada en el capítulo 3.	113
Figura 5.7: Interfaz gráfica de usuario del software IUNO, que muestra las rutas de exploración de una casilla de 1 km por 1 km dadas por las cuatro coordenadas geográficas (UTM) P1 (30T 690 4180), P2 (30T 690 4179), P7 (30T 691 4180) y P8 (30T 691 4179).	114
Figura 5.8: Fotografía de un investigador usando IUNO en un experimento. (Cortesía UPCT).	115
Figura 5.9: Esquema unifilar.	119
Figura 5.10: Esquema eléctrico.	120
Figura 5.11: Paneles solares.	121
Figura 5.12: Baterías.	122
Figura 5.13: Baterías. (Cortesía UPCT).	122
Figura 5.14: Esquema eléctrico del sistema propulsores y baterías.	123
Figura 5.15: Sistema de propulsión eléctrica, motores fuera borda Torqueados.	124
Figura 5.16: Propulsores eléctricos colocados sobre la popa de la embarcación. (Cortesía UPCT).	124
Figura 5.17: Regulador de carga FLEmax.	125
Figura 5.18: Dispositivos electrónicos y reguladores sobre la embarcación. (Cortesía UPCT).	125
Figura 5.19: Reguladores reductores de tensión.	126

Figura 5.20: Sensor de energía.	126
Figura 5.21: Mando doble para actuar sobre los 2 motores eléctricos.	127
Figura 5.22: Gráfica con la producción y pérdidas.	128
Figura 5.23: Gráficas de producción y PR.	129
Figura 5.24: Diagrama de Sankey obtenido.	130
 Figura 6.1: División en casillas de 1 km de lado y Coordenadas UTM de situación del Mar Menor, estando numeradas desde la 1 hasta la 182.	134
Figura 6.2: Exploración de la casilla 102 realizada en trazos de idas y venidas. Representación en el HMI de IUNO [55].	136
Figura 6.3: Mapa de Colores del Mar Menor que representa el estado de cada casilla, según los valores medios de los parámetros físico-químicos obtenidos de los 6 sensores del ASV-Boya, se aprecia el nivel elevado de los Nitratos en la casilla número 31, en color rojo.	137
Figura 6.4: Trayectoria a seguir para que el ASV-Boya navegue de la casilla 145 a la 31. ...	137
Figura 6.5: Mapa de Colores del Mar Menor, se aprecia el nivel elevado de la Clorofila en la casilla número 5, en color rojo y trayectoria a seguir por el ASV-Boya.	138
Figura 6.6: Mapa de Colores del Mar Menor, se aprecia la casilla 69 en color rojo por una alerta introducida manualmente en el HMI de IUNO y trayectoria a seguida por el ASV-Boya.	139
Figura 6.7: Esquema de color de las casillas. Las casillas con un número y un color son las que se han explorado y, por lo tanto, han actualizado los datos. Los colores combinados sin números son valores previamente recolectados. Las casillas sin color son aquellas para las cuales no hay datos disponibles y requieren monitoreo. Los valores en rojo (alarmas) simulan posibles derrames o contaminación.	140
 Figura 6.8: Generación y consumo de energía durante el experimento de navegación autónoma de 10 días. Aunque la escala de todos los tiempos son los mismos, las unidades son diferentes: Vatios para el consumo y la generación y Vatios/hora para la energía de las baterías.	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Valores teóricos de los parámetros físico-químicos, de cada una de las 25 casillas, que se han introducido al Sistema difuso “Fusión Sensores”.	70
Tabla 4.2. Listado de las 65 Reglas de conocimiento utilizadas en el módulo “Fusión Sensores”, se pueden ver las condiciones para los 6 parámetros y en la entrada “Clorofila” está en nivel “Malo”, por lo que la salida toma el nivel “MuyMalo”, condición proporcionada por la regla número 1.	84
Tabla 4.3. Valores del Fichero que lee los datos de una tabla en Excel y los guarda en una matriz en Matlab, $si=x1(i,1:end)$; donde “si” son los valores leídos de los sensores de cada casilla, “x1” es la variable de la matriz, “(i,1)” i representa la fila leída y el 1 la columna.	88
Tabla 4. 4. 17 Reglas de conocimiento utilizadas en el módulo “Planificador Estratégico” en Matlab.	93
Tabla 4. 5. Con las 18 Reglas de conocimiento utilizadas para el Nivel Táctico.	99
Tabla 5.1. Comparativas entre los módulos de la Arquitectura propuesta en esta tesis en el capítulo 3, con los bloques y módulos de la arquitectura implementada en el ASV-Boya de la Figura 5.9.	114
Tabla 5.2. Elementos eléctricos y electrónicos de la embarcación, consumos, horas de funcionamiento y energía consumida.	116
Tabla 5.3. Componentes principales de la embarcación usada para el experimento.	118
Tabla 5. 4. Características de los módulos solares utilizados por la embarcación.	121
Tabla 5. 5. Datos obtenidos de radiación diaria, mensual y anual del sistema energético solar.	127
Tabla 6.1. Valores obtenidos de los parámetros físico-químicos, de cada una de las casillas estudiadas, que se han introducido al Sistema difuso “Fusión Sensores”.	133
Tabla 6.2. Valores promedio de los parámetros en la casilla 102.	135

GLOSARIO DE TERMINOLOGÍA

3D	3 dimensiones
ASV	vehículos autónomos de superficie
AUV	vehículos autónomos subacuáticos
BD	Base de datos
C/C++	Lenguaje de programación
CANopen	Bus de campo abierto y basado en CAN
CPU	Unidad central de procesamiento
DANA	Depresión Aislada en Niveles Altos de la atmósfera
FEE	Fundación para la Educación Ambiental
Fuzzy Logy	Lógica difusa
GHz	Gigahercios, medida de frecuencia
GPS	Sistema de posicionamiento global por satélite
Impp	Intensidad en el punto de máxima potencia en amperios
IP67	Índice de protección
Isc	Intensidad de cortocircuito en Amperios
IUNO	Interface for Underwater drOne
JCR	Journal Citation Reports (Factor de Impacto)
Kbps	kilo bytes por segundo, medida de transmisión de datos
KML	Keyhole Markup Language
KMZ	Keyhole Markup Zip
kW	kilovatios, medida de la potencia
LFP	fosfato de litio y hierro
MJ m ² /día	Radiación en Megajulios por metro cuadrado y por día
MPPT	Seguimiento del punto de máxima potencia
MySQL	Sistema de administración relacional de base de datos
NiMH	Níquel metal hidruro

NMEA	Asociación Nacional de Electrónica Marina
OEPM	Oficina Española de Patentes y Marcas
OMD	detector óptico de metano
ppm	Partes por millón
PR	Performance Ratio de una instalación solar
Q1	Primer cuartil
RAM	Memoria de acceso aleatorio
ROV	vehículos operados a distancia
SAUV	vehículos autónomos subacuáticos con energía solar
sbRIO	Controlador programable National Instruments
USV	vehículo de superficie no tripulado
UTM	Coordenadas
Vdc	Tensión en corriente continua
Vmpp	Voltaje en el punto de máxima potencia en voltios
Voc	Tensión en circuito abierto en Voltios
Wh/kg	Vatios hora por kilogramo en una batería
WiFi	Wireless Fidelity
Wp	Vatios pico, potencia de salida de los módulos solares
WSN	Wireless Sensor Networks
ZEC	Zonas Especiales de Conservación

Capítulo 1 Introducción. Motivaciones de la tesis

1.1 Introducción.

1.1.1 Los mares, fuente de alimentos, riqueza y vida.

Los mares del mundo son un recurso valioso, así como un elemento clave en la ecología y sostenibilidad del medio ambiente, que necesitan protección como una fuente importante de alimentos, riqueza y vida.

La Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008, por la que se establece un marco de acción comunitaria para la política del medio marino (Directiva marco sobre la estrategia marina) establece en el punto (3):

“El medio marino es un patrimonio muy valioso que ha de ser protegido, conservado y, cuando sea viable, rehabilitado, con el objetivo final de mantener la biodiversidad y preservar la diversidad y el dinamismo de unos océanos y mares que sean limpios, sanos y productivos. A ese respecto, la presente Directiva debe, entre otras cosas, promover la integración de las consideraciones medioambientales en todas las políticas pertinentes y proporcionar el pilar medioambiental para la futura política marítima de la Unión Europea”.

Por otro lado, la Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino (BOE Núm. 317, de 30 de diciembre) (incorpora al derecho español la Directiva 2008/56/CE), básicamente establece las medidas para preservar y proteger el medio marino, asegurar el uso sostenible, prevenir la contaminación y recuperar los ecosistemas marinos.

Para dar cumplimiento a esta Ley, se necesitan sistemas y tecnologías para monitorear el estado del medio marino y garantizar su gestión sostenible, asimismo evitar su deterioro y disminuir su contaminación.

Existen diferentes causas que contaminan el medio marino [1] y [2]. Las principales son:

Contaminación química: Son sustancias tóxicas que terminan en los mares, océanos, ríos y ramblas que proceden de actividades industriales, restos de productos químicos, de minas abandonadas, etc., como el amianto, el plomo, mercurio, fosfatos, nitratos, etc., también hay jabones y detergentes y los contaminantes emergentes que son productos de origen farmacéutico (para la salud humana), como los antibióticos, antihipertensivos y los analgésicos, también los productos de aplicaciones veterinarias, de cuidado e higiene personal, polímeros, etc.

Aguas residuales: Son los desechos provenientes de actividades industriales, hogares, comercios, etc., que no son tratadas adecuadamente y terminan en el medio marino.

Actividades agrícolas y aguas pluviales: En la agricultura se utilizan productos químicos como los insecticidas, herbicidas, plaguicidas, fertilizantes, abonos, etc., que después de las lluvias son arrastrados a las ramblas, ríos y finalmente terminan en el medio marino.

También se utilizan microdesaladoras en la agricultura para desalar el agua extraída de pozos donde parte de la salmuera de desecho termina en los cauces de ramblas.

Plásticos y microplásticos: Se arrojan una gran cantidad de residuos sólidos no degradables a los mares, sobre todo plásticos, que los animales marinos los confunden con alimento o se enredan entre estos residuos, con el tiempo los fragmentos de plástico se convierten en microplásticos, que son tóxicos tanto para la vida marina como para los humanos. Según se pronostica en [3], en 2050 habrá más toneladas de residuos plásticos que peces en los océanos.

La UE está preparando una estrategia que sienta las bases de una nueva economía de los plásticos, donde su diseño y productos derivados respeten totalmente las necesidades de reutilización, reparación y reciclaje, se desarrollan y promueven materiales más sostenibles [4].

Instalaciones petroleras y sus actividades: Cuando utilizan radares mediante sonar dañan el equilibrio de especies marinas como las ballenas, orcas y delfines.

Derrames de combustibles: Casi siempre son causados por accidentes de barcos, por extracciones petrolíferas, veleros, etc., que suelen verter al mar aceites, petróleo, gasoil y otros combustibles de origen fósil no degradables, suelen ser muy perjudiciales para el medio marino.

Cambio Climático: Este factor contamina de manera indirecta al medio marino mediante el aumento de la temperatura del agua.

La contaminación del medio marino de todos o de alguno de estos factores provoca principalmente los siguientes efectos:

Pérdida de la biodiversidad: Se debe a la sobrepesca y a la pérdida de especies de la fauna y flora marina.

Eutrofización: Consiste en un exceso de nutrientes, sobre todo de fosfatos y/o nitratos, provenientes de actividades industriales y agrícolas que provoca la proliferación de algas, al consumir más oxígeno y también reducen la entrada de la luz solar, esto puede dar lugar a cambios del ecosistema marino.

Disminución del oxígeno y acidificación de las aguas: El aumento de la temperatura del agua hace que disminuya el oxígeno disuelto, y genera grandes problemas a la fauna y flora marina. El exceso de CO₂ provoca la acidificación de los mares cambiando el pH del agua.

1.1.2 Necesidad de monitorear el medio marino. Caso particular del Mar Menor.

El manejo exitoso de los recursos marinos se consigue mediante el monitoreo de los parámetros físico-químicos relacionados con la calidad del agua, como la salinidad, la temperatura, el oxígeno disuelto, los nitratos, los fosfatos, la densidad, el pH y los niveles de clorofila, entre otros.

Otras razones para monitorear el lecho marino incluyen, detectar y conservar artefactos de valor arqueológico, monitorear el estado de la flora y fauna marina, especialmente las especies sensibles en peligro de extinción, detectar y eliminar contaminantes y plásticos hechos por el hombre.

Es importante realizar un seguimiento de la evolución de los valores físico-químicos del agua y del medio ambiente que le rodea, para que se puedan tomar las medidas necesarias con las que evitar valores perjudiciales en los ecosistemas marinos que puedan llegar a perjudicar a las personas, así como para recuperar aquellas zonas marinas que hayan sido contaminadas.

A lo largo de la historia el hombre ha hecho uso de los recursos naturales proporcionados por los mares aprovechando su valor económico, pero sin tener en cuenta los daños a los ecosistemas marinos de los océanos y de los mares, creyendo que por su inmensidad eran capaces de absorber y neutralizar todo vertido, sobrepesca, etc.

No ha sido hasta finales del siglo pasado cuando realmente se ha empezado a tomar en serio la necesidad de vigilar, monitorear y preservar los mares, quizás por su alto coste y/o por la falta de medios técnicos capaces de analizar las aguas a grandes profundidades y distancias de la costa.

España está rodeada de agua por casi todos sus lados y el Mar Mediterráneo es el que más costa tiene, y es en la costa de la Región de Murcia, donde la laguna costera llamada “Mar Menor”, está siendo afectada de manera particular por varios factores contaminantes, por lo tanto, es muy importante la vigilancia y monitoreo de los parámetros físico-químicos de sus aguas, los residuos plásticos, la sobrepesca, etc.

El Mar Menor está situada en la costa este de España (**Figura 1.1**) y es la laguna salada más extensa de Europa. Está separada del Mar Mediterráneo por una franja de arena y tierra, denominada “la Manga” y a su vez está unida a éste mediante unas golas o canales.

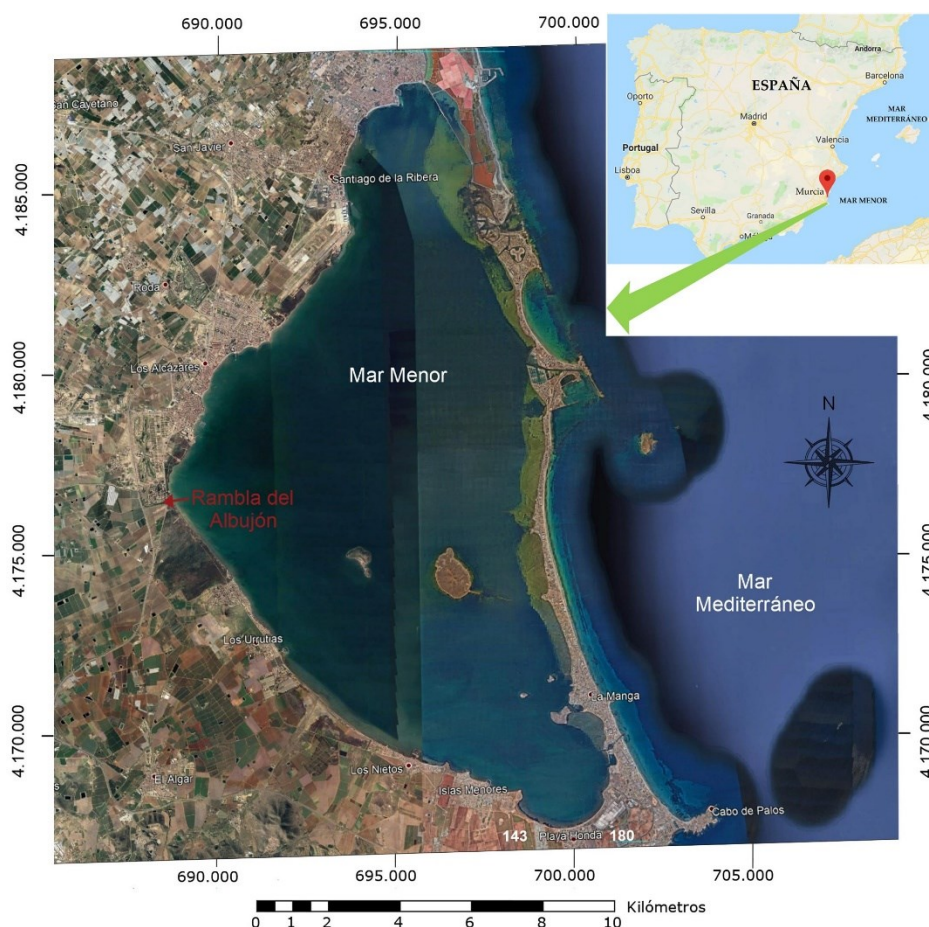


Figura 1.1: Situación del Mar Menor en el litoral español. Imagen tomada de Google Earth.

El Mar Menor posee un ecosistema singular, que en los últimos años está siendo alterado, por ello, ha atraído la atención de numerosos científicos, tales como biólogos, científicos ambientales, oceanógrafos, etc.

Durante muchos años el Mar Menor fue un sistema oligotrófico, es decir, un sistema capaz de autoregularse y mantener bajas las concentraciones de nutrientes inorgánicos de nitrógeno, fósforo, amonio y de clorofila. Debido al aporte de nutrientes como los nitratos, fósforo y amonio, y materia orgánica se ha convertido en un sistema eutrófico, donde los niveles de nutrientes inorgánicos como el nitrógeno y el fósforo han aumentado a niveles superiores a la capacidad autoreguladora de la laguna.

La clorofila *a* se considera un macrodescriptor del grado de desarrollo de las comunidades fitoplanctónicas y, por lo tanto, del grado de oligotrofia-eutrofia. Un mayor contenido de clorofila *a* indica un mayor aporte de nutrientes [5].

En [5], se hace una descripción detallada de los acontecimientos acaecidos desde 2016 hasta 2019 y su impacto en el ecosistema de la zona. Así, desde 2016, cuando los crecientes niveles

de contaminación química y biológica causaron cambios detectables en la composición y balance químico de sus aguas, provocando la eutrofización, las algas proliferaron debido a los niveles intensos de las actividades del ser humano, decolorando las aguas y afectando el ecosistema, ya que las aguas turbias impidieron la penetración de la luz solar y esto afectó a su fauna y flora.

A finales de agosto de 2019, la concentración de clorofila *a* en la columna de agua, aumentó hasta llegar a niveles similares a los rangos de 2015-2016. A mediados de septiembre, una gota fría o DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos de la atmósfera) provocó la llegada de agua a la laguna procedente de la lluvia arrastrando nitrógeno, fósforo y materia orgánica, sedimentos terrígenos y materiales procedentes del campo de Cartagena. Esta agua se mezcló con la capa superficial de agua de la laguna y los niveles de clorofila aumentaron de forma brusca superando la concentración de 2016. Este efecto provocó que días posteriores la elevada turbidez del agua redujera la llegada de la luz a aguas más profundas, reduciendo la transferencia de oxígeno atmosférico y la producción de oxígeno por la actividad fotosintética de la vegetación bentónica, siendo a partir de 3 metros de profundidad donde la concentración de oxígeno llegó a ser nula (0 ppm).

Los niveles de clorofila *a* han evolucionado desde 1990 hasta 2017 en el agua, tal como muestra la **Figura 1.2**.

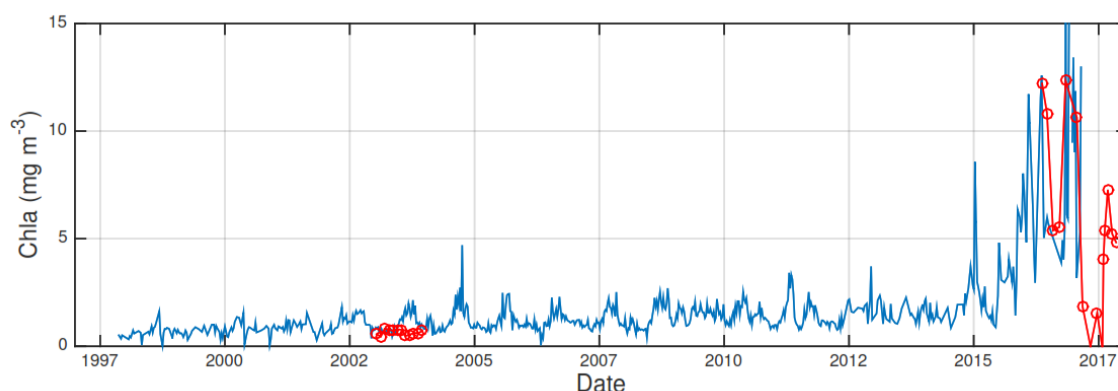


Figura 1.2: Evolución de la *clorofila a* en la columna de agua del Mar Menor entre 1998 y 2017. La línea azul muestra la evolución obtenida a partir del análisis espectral de imágenes de satélite. Los puntos y líneas rojas son valores de clorofila obtenidos directamente a partir de muestras de agua analizadas por espectrofotometría. Imagen tomada de Belando et al (2019).

En octubre de 2019 tanto la falta de oxígeno, los sulfuros y el cambio de salinidad entre los fondos de la laguna y las aguas someras con agua dulce, debieron contribuir a la muerte por


osmosis de la fauna presente en una extensa área al norte de la laguna, aunque los animales muertos aparecieron en casi toda la extensión de la laguna.

En el informe [5], se estima que ha desaparecido de nuevo una superficie de más de 9.000 hectáreas de praderas de (*Caulerpa Prolifera*) y de las comunidades del fondo de la laguna, en 2019.

El turismo también se vio afectado, ya que sus playas perdieron sus 19 banderas azules que la UE concedió entre 2016 y 2018. Las banderas azules [6], son otorgadas por la Fundación para la Educación Ambiental (FEE), que certifica que una playa, puerto deportivo o turístico es sostenible.

Las especies biológicas están siendo desplazadas muy rápidamente y hay riesgo para la salud de los seres humanos y esto puede ser un problema en los próximos años. Una degradación del ecosistema traerá consecuencias dramáticas no sólo para el medio ambiente (especialmente la fauna y la flora) sino también para los agentes socioeconómicos de la zona, con un impacto especial en las actividades turísticas. Por lo tanto, la intervención es urgente para detener las causas ya detectadas de la degradación y realizar estrategias de exploración de la laguna para una mejor comprensión de un ecosistema tan complejo.

Uno de los estudios más recientes es la tesis doctoral de Rubén Moreno [1], que apunta a una multiplicidad de causas para la degradación ambiental del Mar Menor, presentando las variabilidades de tiempo y ubicación que deben analizarse; La entrada de contaminantes provenientes de la agricultura extensiva (principalmente nitratos utilizados como fertilizantes) es uno de ellos y debe medirse en detalle.

Así en [7] se hace necesaria una estrategia de muestreo que atienda a esta variabilidad y permita estimar la entrada de contaminantes a la laguna en la desembocadura de la rambla del Albuñón que se puede ver en la . Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Estudios realizados por otros biólogos como en [8] y en [9], demuestran que los valores de los diferentes parámetros físico-químicos medidos en la laguna del Mar Menor en las diferentes estaciones del año como la temperatura, la salinidad, el material en suspensión, la clorofila, el coeficiente de extinción de la luz, etc., varían lo suficiente para poder realizar como mínimo una exploración y toma de estos valores en cada estación del año.

En estos estudios cuando hay lluvias, tormentas y riadas, sobre todo en la desembocadura de la rambla del Albuñón [10], también se utilizó una estrategia de toma de muestras, por la variación anual de la *Caulerpa Prolifera* y la *Cymodocea nodosa* [11].

Unos días después de la DANA se analizaron muestras de agua de la laguna encontrándose concentraciones de nitratos en torno a 13 mg/L, cien veces por encima de las que se pueden considerar “normales”.

Una implementación precipitada, insuficiente o inadecuada de medidas de restauración, comprometerá seriamente la aplicación de instrumentos de planificación y gestión recientemente aprobados como el Decreto n.º 259/2019, de 10 de octubre, de declaración de Zonas Especiales de Conservación (ZEC), y de aprobación del Plan de gestión integral de los espacios protegidos del Mar Menor y la franja litoral mediterránea de la Región de Murcia.

Recuperar el buen estado ecológico de todos estos espacios de forma integral, que cuentan con múltiples figuras de protección nacional e internacional, ha de ser la finalidad última de tales actuaciones.

1.2 Motivaciones de la tesis.

1.2.1 Problemática y limitaciones para monitorear el medio marino

La mayoría de las muestras tomadas en los estudios reseñados en el apartado anterior fueron realizadas directamente por los científicos a mano y/o utilizando embarcaciones tripuladas como en [12].

Esto supone un gran despliegue de medios con un coste económico importante, por eso, los científicos utilizan otras técnicas para la toma de muestras, como las que se utilizan en los observatorios oceanográficos, dotados de redes de sensores y sistemas de comunicaciones, que pueden monitorear grandes extensiones de agua de manera continua y eficiente, como se pueden ver en la **Figura 1.3**.

Normalmente, estos observatorios utilizan boyas estáticas o redes de sensores subacuáticos inalámbricos o cableados compuestas por un dispositivo flotador conteniendo algún módulo de captación de energía solar y antena para transmisión de RF, y unos dispositivos sumergidos como sensores, baterías y equipos electrónicos, pero sólo pueden tomar medidas en puntos fijos, de una zona concreta, que, en el mejor de los casos, se pueda extrapolar a las áreas circundantes.

Cuando se deben cubrir grandes áreas, las operaciones específicas de despliegue temporal de boyas en dichas áreas, deben planificarse y ejecutarse. El costo, en términos de tiempo y dinero, de tales operaciones es normalmente alto y en proporción al área monitoreada.

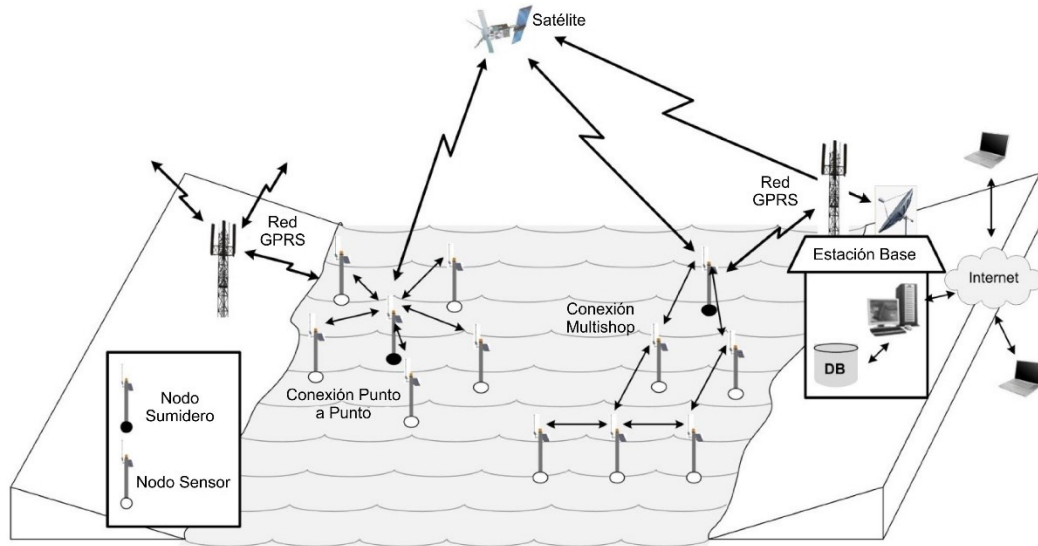


Figura 1.3: Estructura general de redes de sensores inalámbricos aéreos para el monitoreo oceanográfico. Imagen tomada de [13].

El despliegue permanente de una gran cantidad de boyas no es factible debido a su impacto en el medio ambiente marino y su vulnerabilidad al vandalismo. Necesitan un mantenimiento de los dispositivos sensores, las antenas de comunicaciones y las baterías [13]. Además, los sistemas basados en boyas y redes de sensores fijos no disponen de suficiente energía para mantener sus equipos en funcionamiento permanente.

Para obtener lecturas confiables y evitar errores al extrapolar las mediciones a otras áreas, es fundamental emplear sistemas de monitoreo apropiados y diseñados a la medida que puedan cubrir grandes áreas con toma de datos reales.

Los robots marinos, como son los vehículos operados a distancia (ROV), los vehículos autónomos subacuáticos (AUV) o los vehículos autónomos de superficie (ASV), no sufren las principales limitaciones de las boyas, principalmente porque son móviles en lugar de estáticos y por tanto pueden cubrir grandes áreas de exploración y hoy en día están disponibles para una amplia gama de misiones de observación. Por lo tanto, parecen la mejor opción para colaborar con redes de sensores y boyas fijas en la toma de muestras de parámetros físico-químicos del agua.

Sin embargo, todos tienen una autonomía de suministro energético limitada y, por tanto, el área que pueden cubrir también lo es. Tampoco disponen de sistemas de gestión inteligente de su energía que permitan optimizar su empleo en misiones de larga duración para planificar adecuadamente las zonas a monitorear.

Debido a estas limitaciones energéticas, deben ser transportados al área de observación, desplegados durante un cierto tiempo y recogidos cuando finaliza la misión, todo lo cual, además de no ser capaces de realizar el monitoreo permanente de grandes áreas, implica importantes costos logísticos adicionales.

A todo esto, hay que añadir los problemas comunes que conlleva la navegación de vehículos autónomos en entornos desconocidos, que constituye uno de los retos tecnológicos más importantes en el campo de la robótica móvil. Se podría resumir como el reto de que un robot se oriente de forma autónoma en un entorno desconocido donde haya obstáculos no previstos y que a su vez se pueda adaptar a cambios en su misión para llegar a un objetivo definido.

Este reto requiere de una combinación adecuada de sensores e inteligencia artificial para procesar datos del entorno donde se mueve el robot y convertirlos en conocimiento del medio y capacidad de toma de decisiones que se aproxime a lo que hacemos los seres vivos para orientarnos en cualquier entorno desconocido.

Además, a los robots móviles marinos hay que añadir nuevas limitaciones debidas al medio donde se desenvuelven, no sólo la dinámica del agua y su impacto en cálculo y planificación de trayectoria del vehículo (corrientes, oleaje, etc.), sino también el suministro de energía al vehículo y las comunicaciones.

La autonomía energética constituye un reto importante sobre todo en el caso de misiones de larga duración o la necesidad de una presencia permanente de observaciones en áreas determinadas.

Las comunicaciones, necesarias para enviar información en tiempo real e instantánea de los parámetros físico-químicos del agua en la zona explorada a una central de control y/o a un sistema de almacenamiento de datos masivo, son más difíciles también en un medio marino, más aún en el caso de los AUVs, que están obligados a emerger para transmitir datos. Por ello es necesario implementar sistemas de comunicaciones eficientes, gestionados de manera inteligente junto con estrategias de navegación eficiente para evitar gastos energéticos innecesarios.

Así, se podría concluir que los principales problemas para la monitorización del medio marino utilizando vehículos autónomos son:

- La navegación en un entorno no estructurado, donde puedan aparecer obstáculos imprevistos que dificulten alcanzar un objetivo/meta.

- La toma de decisiones para la generación automática de rutas cuando se requieran cambios en la misión.
- Disponer de inteligencia que les permita adaptarse a un entorno exigente y variable.
- La falta de autonomía energética para abastecer al robot de forma permanente en misiones de larga duración.
- Dificultades en las comunicaciones debidas a la carencia de cobertura de los equipos de comunicaciones embarcados.
- La climatología que podría impedir la navegación en ciertas épocas del año o momentos concretos.

1.3 Soluciones para misiones autónomas de larga duración en aguas poco profundas.

Un vehículo de superficie autónomo (ASV) o un vehículo de superficie no tripulado (USV) consiste en un barco o vehículo de superficie, en el mar u otra superficie líquida, que opera sin tripulación [14] y [15]. Son plataformas no tripuladas inteligentes, con navegación autónoma u operadas a distancia mediante comunicaciones inalámbricas.

Los ASV se pueden utilizar para fines científicos, para actividades comerciales, para fines militares y actividades turísticas y de recreo, etc., como las siguientes:

Vehículo de ayuda a la investigación: Son plataformas construidas por grupos de investigación dependientes de Universidades o centros de investigación con el objeto de servir de prototipos de pruebas con constantes cambios y mejoras, suelen ser utilizadas como proyectos fin carrera, tesis doctorales, para publicaciones, como prueba de prototipos, etc.

Verificación de la calidad del agua y del medio ambiente: Son vehículos que llevan adosados sensores que toman muestras o valores de parámetros físico-químicos del agua y del aire y almacenan los datos o los envían a un centro de control para su análisis en tiempo real o posterior [16]. A veces llevan sondas multiparamétricas con diversidad de sensores y/o sistemas de muestreo unidos al casco consistentes en tubos, recipientes, contenedores, mallas, filtros, etc., que pueden ser controladas a distancia mediante radio control o de forma autónoma por el propio sistema de control de la embarcación.

Estudios oceanográficos: Para estudios sobre la fauna y flora marina, seguimiento de animales mediante GPS, erupciones marinas, terremotos, etc. Estos ASV operar independientemente, en flotas cooperando, o incluso podrían acoplar mediante un cable umbilical un submarino autónomo AUV (autonomus undawater vehicle), consiste en un equipo para realizar estudios

oceanográficos del fondo del mar, con sensores adosados, cámaras de toma de imágenes, pinzas robóticas, etc.

Estudios hidrológicos: Para la realización de batimetrías. En mares de aguas someras y/o en las proximidades de la costa de poca profundidad hay recursos marinos importantes que hace falta su estudio, pero que con una embarcación tripulada no es posible hacer estos estudios, se necesita una embarcación de poco calado capaz de operar en aguas someras y que lleve instrumentos hidrológicos.

Estudios de nuevas fuentes de energía: A veces es necesario realizar estudios y pruebas de nuevos dispositivos y es necesario mantener una embarcación largos períodos de tiempo y de forma permanente, todo el día, en condiciones climatológicas adversas en lugares remotos o de poca o ninguna presencia humana, al objeto de verificar un prototipo de generador o invención para obtener energías de fuentes alternativas como son la eólica marina, la solar, corrientes marinas, de las olas, gradientes de temperatura, mareas, etc.

Limpieza de océanos y mares: Debido al aumento importante de contaminación de los océanos y de los mares bien por vertidos de factorías, por desperdicios del hombre, por desastres marítimos, accidentes petrolíferos, etc., los ASV son una importante ayuda a la hora de realizar limpiezas de estos residuos operados de forma autónoma o a distancia por un centro de control.

Búsqueda de pecios y restos arqueológicos [17]: Los ASV pueden ser utilizados para realizar exploraciones del fondo del mar mediante equipos de sónar o sistemas de barrido, pueden llevar cámaras de inspección adosadas al casco, de manera que a baja velocidad pueden realizar barridos de una determinada zona georreferenciada mediante GPS, lo que permite una vez localizado un pecio u objeto se establezca la posición exacta del mismo.

Vigilancia de puertos: Un ASV puede operar mejor que unas cámaras fijas, ya que puede moverse por un puerto de forma silenciosa y durante todo el día, tomando imágenes de cualquier intruso sospechoso, seguirlo y acercarse a él, posteriormente puede comunicar con un puesto de control de seguridad la intrusión localizada, a la vez que guarda las imágenes en una base de datos.

Búsqueda y rescate marítimo: Cuando se produce un accidente, catástrofe o desaparición de personas, la búsqueda y rescate de personas es compleja debido a la gran superficie de los mares, a la climatología, a la baja visibilidad, a la oscuridad de la noche, etc., realizar esto con buques tripulados es complicado y peligroso. Lo ideal es disponer de uno o varios ASV que mediante GPS vayan a la zona del siniestro, realicen una exploración del lugar y envíen

imágenes y datos del lugar, además si llevan sensores y detectores pueden encontrar a personas y/o animales y enviar su posición exacta. También pueden llevar equipos de salvamento, medicinas y víveres, etc., a zonas donde haya ocurrido un siniestro, donde no es posible acceder mediante presencia humana.

Ayudas en acuicultura: Los ASV puede utilizarse para realizar labores de inspección, acciones de control, seguimiento y vigilancia en áreas de cultivo y en plataformas marinas.

Seguridad marítima: Mediante los ASV se puede tener un sistema de seguridad marítima que garantice la seguridad de los puertos, la protección de los buques, ciudades costeras, de las playas y costas, infraestructuras marinas como parques eólicos, centrales eléctricas, gaseoductos, equipos de telecomunicaciones, etc., sobre todo frente a ataques terroristas y en localización de minas submarinas.

Soporte a las fuerzas y cuerpos de seguridad marítima: Son instrumentos de seguridad que junto con drones aéreos pueden formar un sistema eficaz contra la vigilancia de costas en contrabando de armas, estupefacientes, localización y detección de pateras y personal proveniente de otros países sin permiso.

Para el caso de aguas poco profundas, los vehículos Autónomos de Superficie pueden ser una solución muy apropiada, ya que pueden sobrepasar las limitaciones energéticas y de comunicaciones que se han descrito en la sección anterior.

En cuanto a las comunicaciones, pueden embarcar sistemas con diferentes tipos de tecnologías de comunicación inalámbricas que cubran las faltas de cobertura.

Las dificultades energéticas pueden ser sobrepasadas incorporando plantas de generación de energía desde fuentes renovables, junto con un sistema de gestión de energía inteligente integrado con el sistema de control del vehículo, que adecue el gasto energético y la acumulación para garantizar el abastecimiento energético permanente.

A pesar de todas las ventajas que ofrecen y que se constatan en las aplicaciones enumeradas, los ASV también están limitados para realizar misiones de larga duración que garanticen la observación y el monitoreo permanente de parámetros físico-químicos de áreas de mar extensas:

- No hay soluciones viables al monitoreo permanente en aguas someras o poco profundas con ASVs y que puedan realizar exploraciones de larga duración de zonas marinas georreferenciadas, debido, sobre todo, al aporte de energía para su navegación y funcionamiento de sus equipos eléctricos y electrónicos.

- No se han encontrado estudios sobre embarcaciones autónomas con generación energética a bordo desde fuentes de Energías Renovables con sistemas de gestión energética en las que se adecúe el gasto y el suministro energético a la misión que desarrolla el vehículo.
- No se han encontrado embarcaciones autónomas para la monitorización automática en aguas someras que integren sistemas de control con toma de decisiones autónoma e inteligente para la generación de rutas de monitorización y observación oceanográfica.

Para solventar estas limitaciones, en esta tesis, se propone una solución que permita garantizar una presencia permanente en el área de exploración, con un nuevo concepto que consiste en un vehículo de comportamiento híbrido ASV-Boya que se abastece de energía mediante módulos solares fotovoltaicos, que lleva a bordo. El sistema es una combinación de vehículo autónomo y boya fija, cuya energía y autonomía de navegación se gestionan gracias a una arquitectura de software capaz de tomar decisiones de forma inteligente y autónoma.

La solución propuesta aúna la libertad de movimientos y capacidad de cubrir grandes áreas de exploración de los ASVs, con la posibilidad de anclarse al fondo marino y convertirse de ese modo en una "boya" estática, que puede seguir realizando medidas mientras recarga las baterías.

A esta solución la hemos denominado Observatorio Robótico BUSCAMOS (BUSCAMOS-RobObs) **Figura 1.4**.



Figura 1.4: El Observatorio Robótico BUSCAMOS (BUSCAMOS-RobObs) navegando en el Mar Menor.

En párrafos anteriores se ha destacado que una de las principales limitaciones son el aporte energético a estos vehículos autónomos que les permita alargar el tiempo de las misiones.

En esta tesis se defiende la utilización de fuentes de energía renovables porque las soluciones basadas en combustibles de origen fósil contaminan la zona a observar, son costosas y es necesario llevarlas almacenadas a bordo, por lo tanto, se agotan.

La utilización de la energía solar, con suficiente radiación recibida en la mayor parte de la superficie terrestre, y en especial en las zonas del sur de Europa y concretamente en la Región de Murcia [18], parece ser la fuente de energía alternativa ideal.

Sin embargo, los ASV solares que se estudian en el estado de la técnica, tienen un área o superficie limitada para contener módulos solares para obtener su energía eléctrica, esta energía no es suficiente para mantener los propulsores y los sistemas de control en funcionamiento permanente en largas misiones y a veces no disponen de suficiente energía para cargar sus baterías, por lo tanto, los sistemas de captación de energía solar y los sistemas de gestión energética deben ser lo más eficientes posibles para minimizar los tiempos de espera para cargar sus baterías.

Estas operaciones pueden ser difíciles en condiciones climáticas adversas, pueden requerir más energía para evitar la deriva manteniendo un sistema de propulsión al mínimo, también pueden estar obteniendo menos energía de la que consumen sus equipos y no ser suficiente para recargar sus baterías, e incluso pueden dar como resultado un apagado de los sistemas de navegación o incluso del propio ASV.

Cuando se trata de gestionar la energía procedente de varias fuentes y almacenarla en baterías, para que un barco pueda abastecerse de manera indefinida en el mar, se requiere constantemente cambios de estrategia de los estados operativos basados en datos proporcionados por sensores y predicciones, y por lo tanto es necesario tomar decisiones que adecúen las necesidades energéticas y previsiones para mantener operativo el vehículo sin apagados energéticos. Si se solucionan estos aspectos, se aseguraría la energía necesaria para llevar a cabo operaciones de muy larga duración, con presencia permanente en una zona de exploración.

En esta tesis se explica cómo el ASV-Boya “BUSCAMOS-RobObs” puede abastecerse con energía solar fotovoltaica, que puede satisfacer la demanda de energía del barco, se utilizan módulos especiales fotovoltaicos flexibles para el transporte marítimo, que pueden resistir los ambientes marinos y aligerar el peso. El resultado es un vehículo de superficie autónomo híbrido ASV-Boya que se puede utilizar con el menor impacto ambiental.

Este diseño permite gran flexibilidad de operación y optimización energética dado que el vehículo es capaz de evitar la deriva y los posibles accidentes cuando se encuentra anclado en

el "modo de boya", especialmente importante cerca de la costa y reanuda las tareas de monitoreo cuando se alcanza el nivel de energía de las baterías establecido.

Todas sus operaciones son gestionadas por el control central del vehículo y el sistema de toma de decisiones. El sistema de toma de decisiones calcula la ruta a la siguiente área que se explorará teniendo en cuenta una serie de parámetros, que incluyen: la posición del vehículo, los parámetros físico-químicos del agua, la distancia a la siguiente área de exploración, la radiación solar, la energía disponible en sus baterías, la velocidad del viento y dirección, corrientes de agua, etc.

Esta embarcación solar exploradora lleva diversos sistemas de medida basados en sensores y una sonda multiparamétrica, que captura información de los valores físico-químicos del agua y del medio ambiente. Dicha información es recibida y procesada en su unidad de control o CPU, para actuar en función de la estrategia programada, para cumplir su misión, pero a veces, igual que el ser humano, se encuentra con un problema de decisión donde se plantea un conjunto bien definido de alternativas de acción posibles, al menos dos, por eso, es necesario dotar al ASV-Boya de un sistema inteligente de toma de decisiones, que en esta tesis se implementa utilizando la Lógica Difusa.

Así, la embarcación solar es capaz de mantener su funcionamiento en misiones de exploración de larga duración, abastecida sólo con la energía solar recibida y a la vez enviando datos de sus sensores en tiempo-real.

La arquitectura de control, facilita la navegación autónoma del vehículo, evitando obstáculos imprevistos y alcanzando la misión planificada gracias a sus algoritmos de toma de decisiones.

A su vez realiza una supervisión de la energía solar recibida, de la energía almacenada en las baterías, del viento y oleaje. Con estos datos, los algoritmos de lógica difusa gestionan el consumo moderado de energía, variando la velocidad, distancia y amplitud de exploración de la embarcación, para que, en ningún momento se quede sin energía.

En caso de detectar niveles de energía insuficientes para continuar la misión permanecerá anclado en modo boya.

1.4 Objetivos y aportaciones de la tesis.

1.4.1 Objetivos generales.

Una vez revisadas y estudiadas las limitaciones y los problemas que se plantean para la presencia permanente de una embarcación autónoma en un lugar concreto para monitorear las

aguas y el entorno, se plantean una serie de objetivos generales que dan como resultado las aportaciones de esta tesis.

Para solucionar los problemas expuestos en las limitaciones, se propone el diseño de una arquitectura de control con un sistema de toma de decisiones para un vehículo tipo ASV-Boya que pueda navegar de forma autónoma y gestionar la información procedente de sus sensores en tiempo real.

Según puede verse en la **Figura 1.5**, la arquitectura propuesta está formada por varias capas, desde un nivel superior o estratégico, hasta un nivel básico u operativo.

En esta arquitectura de control se ha incluido un módulo energético para gestionar los gastos energéticos que se producen en los diferentes dispositivos eléctricos y electrónicos del ASV-Boya.

En el capítulo 3 de esta tesis se explica con detalle esta arquitectura.

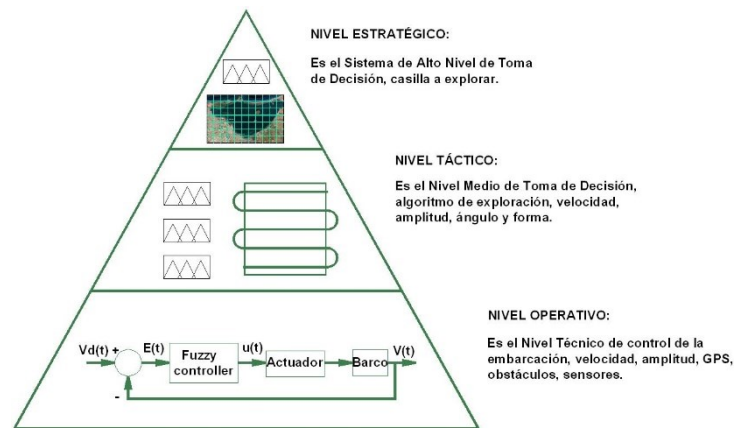


Figura 1.5: Arquitectura básica multicapa.

Para que el ASV-Boya pueda realizar correctamente las misiones, gestionar la energía y la navegación, es necesario que lleve implementada en sus sistemas de control una arquitectura de control multicapa con cierta inteligencia y que sea capaz de tomar decisiones de forma autónoma sin la intervención humana, de esta manera permite gestionar, analizar grandes cantidades de datos recibidos en tiempo real y que se guarden en una base de datos, de acuerdo con ciertas reglas de conocimiento, se obtiene el resultado de qué zona, ruta y dirección es la más apropiada para navegar y explorar.

1.4.2 Aportaciones de la tesis.

Para alcanzar los objetivos generales de la tesis se realizan en la misma las siguientes aportaciones:

- 1- Diseño del sistema de control de una embarcación de comportamiento híbrido boya-embarcación autónoma (ASV-Boya), capaz de convertirse en una boya anclándose al fondo del mar o moverse y navegar como un vehículo marino autónomo de superficie, a la vez que toma muestras de los parámetros físico-químicos del agua y del entorno
- 2- Diseño de una arquitectura de control para toma de decisiones de forma autónoma, que mediante los sensores adecuados recoja información del entorno por el que navega y mediante el estudio de esta información le permita a la embarcación híbrida ASV-Boya disponer de cierta inteligencia y capacidad de tomar decisiones, y así poder navegar de forma autónoma gestionando su energía y las comunicaciones de forma indefinida.
- 3- Diseño de un sistema generador mediante energía solar fotovoltaica específicamente para esta embarcación y gestionado de forma inteligente.
- 4- Diseño de una estrategia de navegación autónoma con gestión de la energía óptima para que la ASV-Boya pueda realizar diferentes comportamientos como desplegar y recoger un ancla para convertirse en una boya o ASV, modificar su velocidad y dirección, tener todos sus dispositivos en pleno funcionamiento.
- 5- Implementación de la arquitectura de control en el entorno de programación Matlab y realizar un modelo mediante Simulink, para probar la viabilidad de la arquitectura y la estrategia de control mediante simulaciones. Para ello se crearán modelos que utilicen datos reales de sensores almacenados previamente de forma que se constate si la arquitectura y las estrategias de control toman las decisiones adecuadas. (Además, se crea un mapa codificado por colores que representa los niveles disueltos en el agua de sus parámetros físico-químicos como la salinidad, la temperatura, la clorofila, el oxígeno, etc.)
- 6- Propuesta de una estrategia de clasificación de zonas georreferenciadas de exploración que faciliten la toma de decisiones en la viabilidad de la ruta de exploración. Para ello se dividirá la zona de exploración (Mar Menor) en cuadrículas georreferenciadas, estableciendo una base de datos de las coordenadas de cada zona, al objeto de tener claramente diferenciados y ordenados los valores de los parámetros físico-químicos de cada zona cuando se realizan las exploraciones.

7- Verificar el comportamiento de la ASV-Boya realizando experimentos para inspeccionar la laguna costera del Mar Menor y monitorear los valores físico-químicos del agua, para llevar a cabo las exploraciones con la mayor precisión y garantías, el sistema de control de toma de decisiones elige la zona más interesante a explorar según el nivel de contaminación, necesidad, etc.

1.5 Estructura del documento de tesis.

Para demostrar la viabilidad de la solución propuesta, además de un estudio comparativo con el estado de la técnica y la explicación del diseño de la arquitectura, se incluyen en este documento de tesis las simulaciones preliminares de gestión de la energía y la autonomía de la toma de decisiones, junto con las descripciones de las misiones de observación reales en el Mar Menor y los resultados obtenidos.

Para ello, el documento de tesis se organiza de la siguiente manera:

- **Capítulo 2**, describe el estado actual de la técnica con la descripción de distintos vehículos robots autónomos, comparando (describiendo) el tipo de arquitectura de control, el tipo de gestión energética, el tipo de sistema de toma de decisiones (si está basado en IA, lógica difusa, control robusto, etc.) y resume las novedades que aporta la solución mostrada en esta tesis respecto a dicho estado de la técnica.
- **Capítulo 3**, diseño de una arquitectura de control con capacidad para tomar decisiones y gestionar la energía de forma óptima para llegar a cubrir áreas extensas de forma autónoma utilizando un sistema híbrido ASV-Boya, en misiones de larga duración.
- **Capítulo 4**, se desarrollan modelos para validar la arquitectura de control que permitan la simulación en el entorno de programación de Simulink/Matlab.
- **Capítulo 5**, se describe el diseño de todo el sistema energético, con los módulos solares, soporte de los mismos, equipos eléctricos y electrónicos, baterías de acumulación, inversores, además se presenta el modelo energético, donde se obtienen los balances energéticos de consumos, pérdidas y generación.
- **Capítulo 6**, se detallan las pruebas realizadas en el Mar Menor y análisis de resultados obtenidos. En estas pruebas el ASV-Boya realiza la navegación en un entorno real, realizando la exploración de diferentes zonas, gestionado mediante la arquitectura de control la toma de decisiones para desplazarse de una zona a otra, o para anclarse al fondo marino y recargar baterías cuando sea necesario.
- **Capítulo 7**, se exponen las conclusiones de la tesis y se proponen trabajos futuros.

Capítulo 2 Estado del arte

2.1 Introducción.

Existen diferentes tecnologías de monitorización para verificar de forma continua el estado de los parámetros físico-químicos y ambientales del medio marino, con el objetivo de determinar el estado oceanográfico del área de estudio y a partir de aquí llevar a cabo actuaciones con las que impedir la contaminación y/o recuperación de zonas marinas contaminadas, utilizando diferentes sistemas de captación y sensores.

Algunas de estas tecnologías se basan en boyas y redes de sensores fijos, otros utilizan embarcaciones autónomas tipo ASV y vehículos autónomos submarinos AUV. Todas estas soluciones basadas en vehículos tienen limitaciones para operar durante largos periodos de tiempo. Las más importantes son: el aporte energético, la toma de decisiones de forma autónoma y las comunicaciones.

En este capítulo se hace una descripción de las soluciones más relevantes existentes para llevar a cabo el monitoreo del medio marino: sistemas estáticos (redes de sensores y boyas) y sistemas móviles basados en vehículos autónomos, que nos llevaron a proponer un enfoque dual, un sistema híbrido (ASV-Boya), estas tecnologías conforman una solución que se ha denominado en esta tesis observatorio robótico oceanográfico móvil para aguas poco profundas y misiones de larga duración.

En [19] concluyen que la realización de misiones de larga duración está limitada por varios factores, que la investigación y la ciencia debe ir superando: (i) el cambio en el estado del mar y el conocimiento a priori del lugar donde se va explorar; (ii) fallos de hardware y software imprevistos durante las operaciones realizadas, (iii) cambios inesperados en los objetivos de la misión, toma de decisiones en tiempo real que permita razonar y cambiar los parámetros de la misión y (iv) el aporte energético, que limita los consumos de los equipos electrónicos y los sistemas de comunicaciones, que además éstos están limitados en ancho de banda.

Dado el objetivo de diseñar un vehículo capaz de estar presente en un entorno marino en misiones de larga duración, se presta especial atención al estado actual de los métodos propuestos para mejorar la autonomía energética de los sistemas autónomos.

2.2 Soluciones de Monitoreo Estático: Boyas y Redes de Sensores

De acuerdo con [20], los observatorios oceanográficos miden variables físicas, químicas y biológicas en aguas costeras, realizan observaciones en tiempo real y proporcionan información

para ayudar en la toma de decisiones sobre problemas de gestión tales como el cambio climático, el impacto humano, la variabilidad costera y la naturaleza, los desastres, o la condición de los ecosistemas.

Normalmente consisten en boyas fijas con diferentes sensores para medir los parámetros de interés, en la **Figura 2.1** se puede ver una de estas boyas, se observa que está compuesta por un mástil o tubo soporte sujeto a un flotador, sobre el que se ha colocado una antena de comunicaciones, dos paneles solares fotovoltaicos para captación de energía eléctrica y poder recargar sus baterías, un faro para su señalización nocturna, una caja conteniendo sistemas electrónicos de comunicaciones y adaptadores de señales para los sensores, un contrapeso para que la boya permanezca en posición vertical, un ancla que la mantiene fijada en el fondo y en la misma posición sujeta mediante un cable de amarre y lleva varios sensores colocados en el fondo del mar.

Los inconvenientes de este tipo de boyas es que permanecen siempre en el mismo lugar, los paneles solares son pequeños y captan poca energía, por lo tanto, no disponen de energía suficiente para permanecer largos periodos de tiempo emitiendo información de sus sensores.

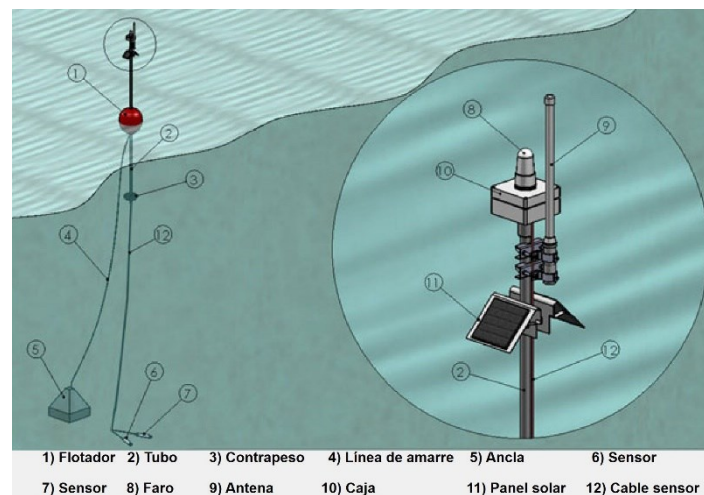


Figura 2.1: Características de boya marina y tipo de nodo (ZigBee/GPRS). Imagen tomada de [20].

Los autores actuales abogan por el uso de redes de sensores inalámbricas WSN (Wireless Sensor Networks) como una solución innovadora para el despliegue de múltiples boyas en áreas costeras, ya que son rentables y tienen un bajo consumo de energía (alimentados por paneles solares), lo que permite un mayor número de sensores para ser desplegados con diferentes topologías de red y protocolos a un costo razonable en aguas costeras poco profundas.

En la **Figura 2.2** se pueden ver varias configuraciones de boyas utilizadas para obtener información de sensores, llevan un peso o contrapeso para permanecer en posición vertical, algunas van sujetas con una línea o cable de amarre al fondo marino mediante un ancla, llevan la electrónica, las baterías y los sensores en la superficie o dentro del agua, según el tipo de boya tal como se describen en [21] y en [22].

Estas boyas cuando se utilizan para observaciones a largo plazo tienen el inconveniente de que los sensores son susceptibles a bioincrustaciones (que a los sensores se les pegan películas microbianas y de algas perjudicando sus funciones).

Los problemas y las limitaciones resaltados en estos artículos incluyen la necesidad de dispositivos de flotación y amarre, posible vandalismo, interferencia del tráfico marítimo, el movimiento de nodos por mareas, olas, embarcaciones, etc., y el hecho de que se requiere un ancla para fijarlos en el fondo del mar.

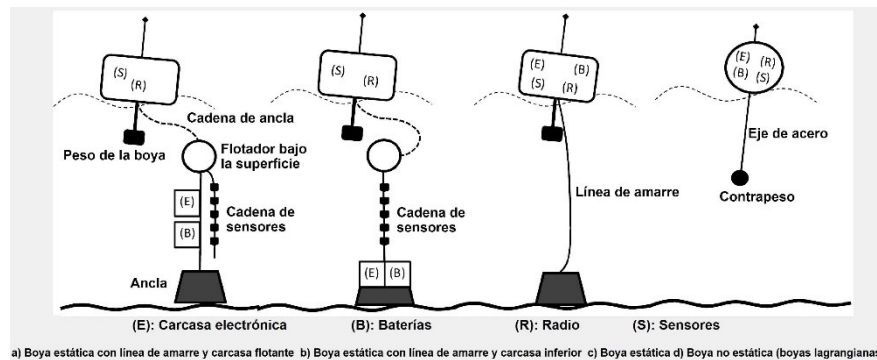


Figura 2.2: Configuraciones más representativas de las boyas utilizadas en A-WSNs. Imagen tomada de [22].

En el estudio realizado en [23] establecen otra manera de obtener los valores de los parámetros físico-químicos del agua como la temperatura, la salinidad, la turbidez, el pH, el oxígeno, el nivel de clorofila, etc.

Estas boyas utilizan una red de sensores estáticos introducidos en el océano y envían los datos por GPRS a una estación base situada en tierra, en la **Figura 2.3** podemos ver uno de estos nodos sensores, se observa la arquitectura genérica utilizada, que está compuesta por un módulo de alimentación con un dispositivo de recolección de energía, que suele estar compuesto por paneles solares fotovoltaicos con cierto ángulo de inclinación colocados en un mástil o tubo, donde la energía eléctrica captada durante el día es tratada por un sistema de gestión de energía, como un regulador de carga, elevador o reductor de tensión y la energía es almacenada en baterías, normalmente de Ión-litio, NiMH, etc., para suministrar la energía necesaria durante la noche o cuando no haya radiación solar.

Lleva una serie de sensores oceanográficos para capturar diferentes parámetros físico-químicos del agua, del entorno y/o del medio ambiente, las señales obtenidas se tratan en un módulo sensor de detección, que las envía a un módulo central de procesamiento y finalmente las señales tratadas son enviadas por un módulo transceptor de comunicaciones a una estación base a través de una antena situada encima del mástil.

Todos los módulos van implementados en sistemas electrónicos y eléctricos y encapsulados en cajas selladas herméticamente para evitar la entrada de agua y humedad. El mástil principal va sujeto a un flotador que la mantiene vertical por encima del nivel del agua, debajo lleva un cable de amarre para sujetar un ancla para mantenerla fijada al fondo del mar.

Las limitaciones principales de este sistema es el aporte energético, que está muy limitado y la necesidad de utilizar muchos sensores para abarcar una zona.

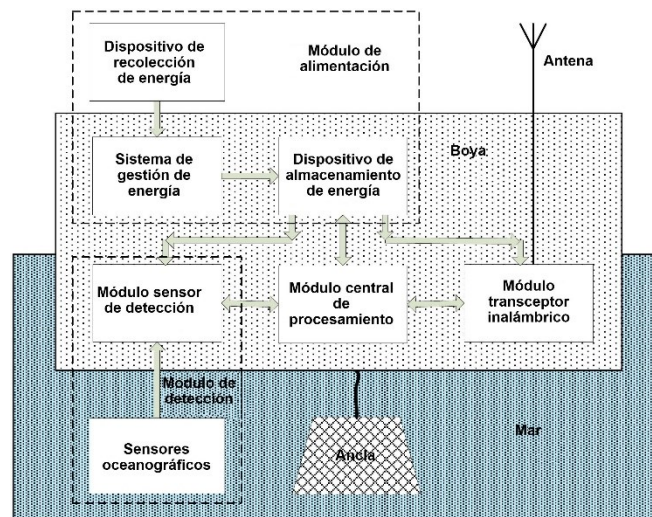


Figura 2.3: Arquitectura general de un nodo sensor oceanográfico. Imagen tomada de [23].

En [24] se hace un estudio del estado de la técnica en la alimentación de nodos sensores inalámbricos, generalmente incluyen baterías, condensadores de alta capacidad, motores térmicos, sistemas termoiónicos, termopares, gradientes de temperatura, sistemas que utilizan variaciones de presión, celdas de combustible y módulos solares fotovoltaicos.

Para nodos pequeños con muy poco consumo y para tiempos de observación de menos de un año las baterías parecen ser lo más apropiado, también las celdas de combustible, pero para tiempos superiores y donde haya suficiente radiación solar, los sistemas fotovoltaicos es el sistema de energía más utilizado en la actualidad.

Sin embargo, en [25], utilizan unas boyas oceanográficas multisensor para monitorear ciertos parámetros físico-químicos del Mar Mediterráneo con el fin de estudiar las praderas de Posidonia, donde se discute que el uso de baterías para almacenar energía tiene muchas limitaciones, como la capacidad de energía restringida, los bajos niveles de energía obtenidos de los paneles solares o el consumo excesivo de los sistemas electrónicos y de comunicaciones, en la **Figura 2.4** podemos ver una de estas boyas, en la figura izquierda podemos ver que está constituida por una estación meteorológica con anemómetro, indicador de la dirección del viento, sensor de temperatura, etc., dos paneles solares fotovoltaicos para capturar la energía solar y utilizarla para almacenarla en baterías, lleva varios equipos de telecomunicaciones y en la figura de la derecha se puede ver el flotador con multitud de sensores oceanográficos colocados dentro y fuera del agua.

Cuando las boyas se quedan sin energía dejan de transmitir. Las baterías agotadas, construidas a base de metales pesados tóxicos, son un desecho altamente contaminante.

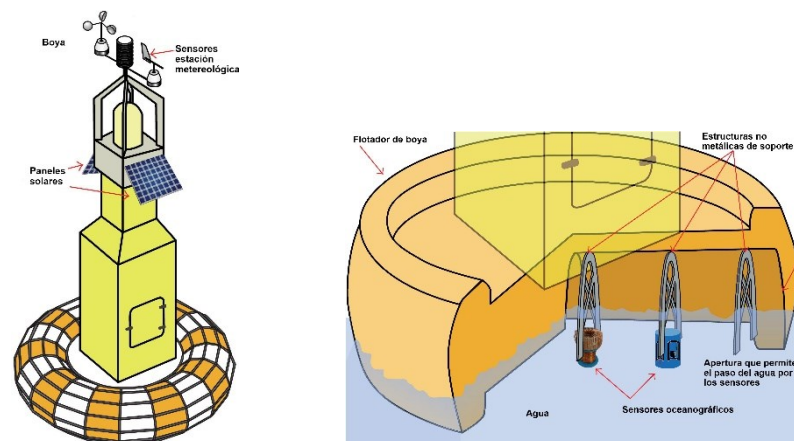


Figura 2.4: Boya multisensor y flotador con sensores. Imagen toma de [25].

En el estudio realizado en [26] utilizan un sistema de carga y descarga de las baterías que evita el agotamiento prematuro de las mismas, las boyas llevan dos equipos de baterías controladas por un sistema basado en microcontrolador de bajo consumo.

Durante el día y con radiación solar un equipo de baterías se carga y el otro se utiliza para alimentar las cargas, al día siguiente se invierte el proceso y se carga con energía solar el otro equipo de baterías, por la noche se utiliza el equipo que más carga tiene, cuando alguno de ellos baja su nivel de energía hasta un valor preestablecido se desconecta de los consumos y hasta que no alcanzan el nivel de carga adecuada no se conectan las cargas.

Las baterías utilizadas son de NiMH, de 4,8 Voltios, aunque utilizan convertidores dc/dc para obtener 3,3 V y 7,5 V, ya que hay equipos que funcionan a estas tensiones.

En la **Figura 2.5**, izquierda se puede ver una de estas boyas con un panel solar fotovoltaico horizontal, dos antenas, una caja con flotador y en la imagen de la derecha se puede ver la arquitectura utilizada, donde se aprecia un panel solar, un mecanismo de recolección de energía para recargar las baterías que se utilizan como dispositivos de almacenamiento de energía, lleva unas unidades de control y procesamiento de los datos, sensores de temperatura y luminosidad o brillo, equipos electrónicos de acondicionamiento de las señales de los sensores y equipos de radio para transmitir los datos a estaciones base locales o remotas, utilizando antenas colocadas encima de la boya.

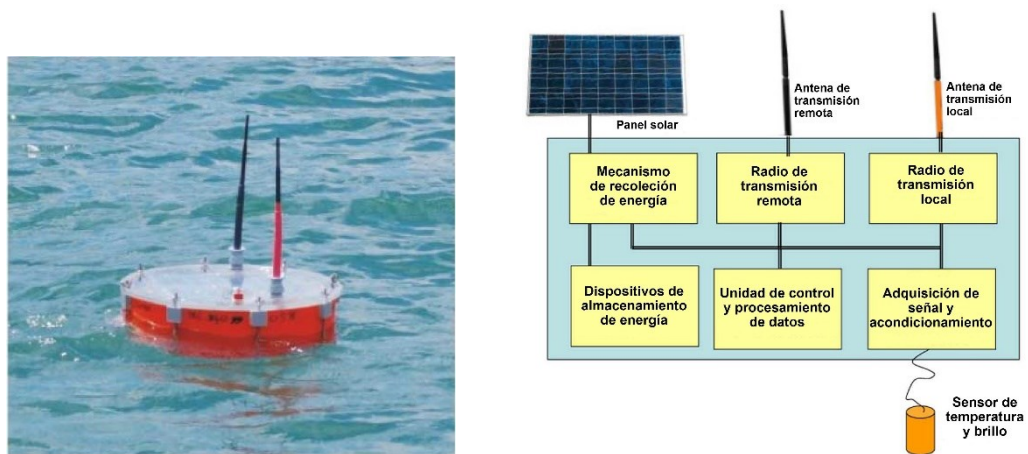


Figura 2.5: Boya sensor Gateway y arquitectura de la misma. Imagen tomada de [26].

La mayoría de los documentos mencionados proporcionan poca información sobre los sistemas de energía en general, y los algoritmos de administración de energía, si existen, se limitan a considerar el voltaje, la intensidad de la batería y tal vez la energía obtenida de los paneles solares.

En muchos de los casos, utilizan dos módulos solares pequeños (2,5 W / 8 V), se instalan con baterías recargables PoLi de 3,7 V / 5 Ah, como en [21], por lo que su limitación principal es el pequeño aporte de energía y por lo tanto tardan mucho tiempo en recargar sus baterías, no son muy apropiadas para misiones de larga duración o para transmitir información de manera continuada durante mucho tiempo, además tienen poca potencia de emisión de sus sistemas de comunicaciones.

En las boyas utilizadas en el artículo [27], los autores supervisaron el consumo de energía de sus equipos electrónicos y eléctricos con un vatímetro digital, los resultados de estos consumos promedio se pueden ver en la gráfica de la **Figura 2.6**, tiene 8 estados funcionales: (1) conexión,

(2) en espera para mensajes, (3) sincronización periódica con la estación base, llamada solicitud de datos, (4) habilitación de interfaz, (5) y (6) adquisición de datos de los sensores, (7) almacenamiento de los datos en la memoria flash y (8) transmisión de los datos a la estación base.

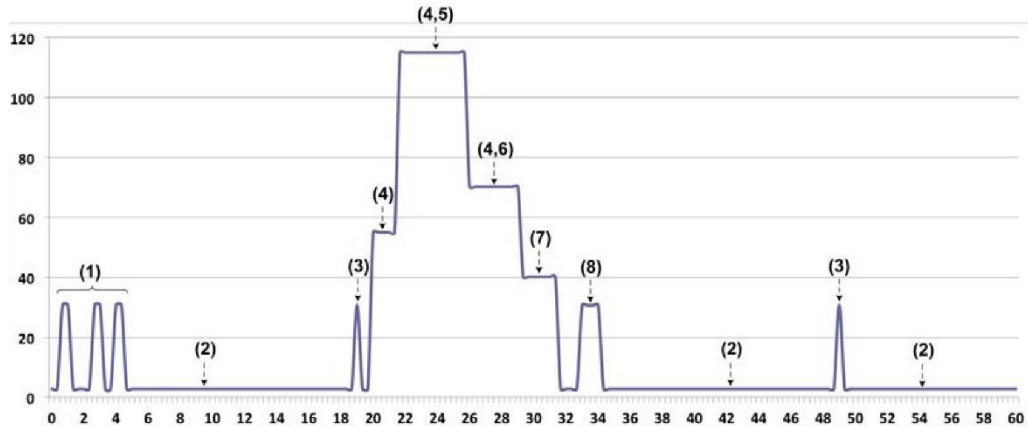


Figura 2.6: Consumo de la boya en cada instante según su estado. Imagen tomada de [27].

De los resultados obtenidos, reprogramaron los dispositivos para un bajo consumo, sin embargo, esto se hizo manualmente en un laboratorio.

Las limitaciones de estas boyas es la baja energía captada por sus pequeños paneles solares, insuficiente para abastecer sus sensores y equipos de comunicaciones, cuyo alcance está limitado a 3 km. Estas boyas no utilizan la información de dichos consumos para crear un sistema de control inteligente para los diversos requisitos de energía.

El sistema de gestión utiliza un protocolo consistente en conectar su sistema de comunicaciones, sincronizarse con una estación base, conectar y captar los datos de sus sensores, almacenar esa información en una memoria flash y finalmente enviar los datos a la estación base, después se pone todo el sistema en espera hasta que se repite el proceso según lo hayan programado.

De todos estos estudios se obtiene la conclusión de que los sistemas de boyas utilizados tienen una serie de limitaciones:

- Una boya desplegada sólo puede proporcionar valores desde el punto de medición fijos durante un tiempo limitado por sus baterías y paneles solares.
- Cuando se deben cubrir grandes áreas, las operaciones específicas de despliegue temporal de boyas en dichas áreas, deben planificarse y ejecutarse. El costo, en términos de tiempo y dinero, de tales operaciones es normalmente alto y en proporción al área monitoreada.
- El despliegue permanente de una gran cantidad de boyas no es factible debido a su impacto en el medio ambiente marino y su vulnerabilidad al vandalismo. Necesitan un

mantenimiento de los dispositivos sensores, las antenas de comunicaciones y las baterías [22]. Además, los sistemas basados en boyas y redes de sensores fijos WSN, no disponen de suficiente energía para mantener sus equipos en funcionamiento permanente.

2.3 Soluciones de Monitoreo Dinámico Autónomo: Vehículos Marinos de Superficie y Submarinos

Los robots o drones marinos, como son los vehículos operados a distancia (ROV), los vehículos autónomos subacuáticos (AUV) o los vehículos autónomos de superficie (ASV), no sufren las principales limitaciones de las boyas, principalmente porque son móviles en lugar de estáticos y por tanto pueden cubrir grandes áreas de exploración y hoy en día están disponibles para una amplia gama de misiones de observación. Por lo tanto, parecen la mejor opción para colaborar con redes de sensores y boyas fijas en la toma de muestras de parámetros físico-químicos del agua.

Los AUV abrieron nuevas oportunidades para el monitoreo y exploraciones marinas, ya que podrían recopilar datos de manera autónoma durante largos períodos de tiempo a un costo menor que los ROV.

Para aprovechar al máximo los AUV, deben poder realizar largas misiones, un objetivo importante de la investigación en sistemas autónomos en general, especialmente en robots marinos como en el estudio en [28] sobre "Autonomía a Largo Plazo en Robótica Marina".

Según los estudios realizados en [29], la autonomía a largo plazo se puede definir como "la capacidad de un robot para operar de manera robusta durante un período prolongado de tiempo (horas, días o incluso semanas), con una supervisión humana reducida y en un entorno real".

Lograr cualquiera de los niveles de autonomía antes mencionados requiere, en primer lugar, conseguir la máxima autonomía energética posible y un sistema inteligente de toma de decisiones que permita razonar, aprender y cambiar los parámetros de la misión.

Los planeadores son, quizás, el mejor ejemplo de vehículos marinos en términos de autonomía energética. Usan poca energía para moverse y modificando su flotabilidad pueden convertir los movimientos de inmersión vertical en un movimiento horizontal, requiriendo así un consumo de energía muy bajo para su desplazamiento. Aunque no son tan rápidos como otros AUV, los planeadores tienen un mayor rango de tiempo de operación y distancia recorrida que los vehículos propulsados por hélices. Sus misiones de medición pueden durar meses y cubrir miles de kilómetros.

Los llamados Wave Gliders en [30] usan la fuerza de las olas para avanzar. Es un vehículo híbrido para superficie marina y subacuático, puede incorporar multitud de sensores para obtener datos meteorológicos y oceanográficos como la velocidad del agua, la temperatura del aire y del agua, la dirección y altura de las olas, la velocidad del viento y la presión atmosférica, etc., lleva GPS, puede detectar la presencia superficial de hidrocarburos naturales.

Consisten en dos partes unidas por un cable: una especie de tabla de surf que flota en la superficie de unos 68 kg de peso y una segunda parte a unos 8 m bajo el agua, como se puede ver en la **Figura 2.7**. Son utilizados para monitorear zonas marítimas en aguas profundas, de gran oleaje, en climas cambiantes y huracanes en misiones de hasta un año de duración.

Este sistema también utiliza paneles solares fotovoltaicos para alimentar la electrónica de a bordo, el motor del timón y la electrónica de comunicaciones, además permiten recargar las baterías de iones de litio. Las principales limitaciones de las soluciones tipo Glider es que no disponen de propulsores propios, son muy lentos, por lo tanto, no son adecuadas para exploraciones exhaustivas del entorno marino, ya que estos vehículos están a merced de las corrientes y las olas. Dado que requieren poca potencia para operar, tienen menos precisión con respecto al área que se va a monitorear.

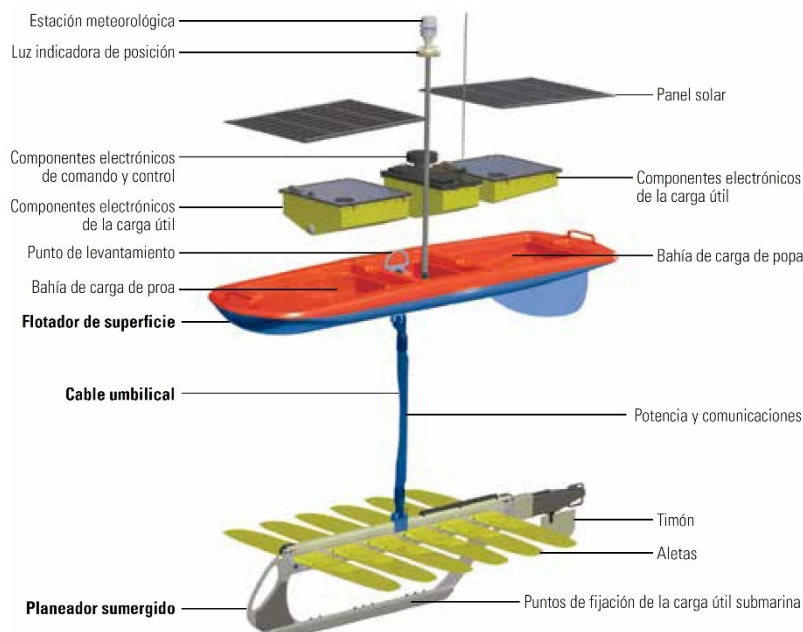


Figura 2.7: Partes del Wave Glider. Imagen tomada de [30].

El sistema estudiado en [31] propone una solución diferente: un algoritmo de planificación de la misión para una serie de planeadores basados en el paradigma de muestreo bajo demanda.

En esta estrategia, el usuario establece cuantitativamente los requisitos relacionados con la incertidumbre sobre un área de interés que debe lograrse por medio de mediciones tomadas observando la zona a explorar.

En general, la incertidumbre puede variar de una región a otra en el área de estudio, de acuerdo con los requisitos operativos de la misión. Por ejemplo, algunas áreas pueden considerarse más importantes de explorar que otras. Las soluciones más precisas, que proporcionan un mejor control de las áreas exploradas, requieren el uso de propulsores, y los propulsores requieren una estrategia completa de gestión de la energía para garantizar largos períodos de actividad de los AUV.

Además en ese estudio hace referencia al servicio MyOcean [32] donde proporciona a los usuarios información del estado de los océanos facilitando datos sobre las corrientes marinas, temperatura, salinidad, etc., con dichos datos se pueden programar y planificar rutas de exploración para los ASV y AUV.

El resto de esta sección resume algunos de los AUV descritos en la literatura en orden de disminución de la autonomía. Para cada vehículo, describimos, cuando es posible, su propósito, los sensores y la electrónica a bordo, el tiempo de misión medido, las fuentes de energía disponibles y su gestión, y si el software del sistema tiene en cuenta los problemas de energía al planificar las misiones.

En [33] se estudia un SAUV muy novedoso, que funciona exclusivamente con energía solar fotovoltaica, de tamaño relativamente pequeño, utiliza dos paneles solares BP585 de 85 Wp, con V_{mpp} : 18 V y I_{mpp} : 4,72 A, con una superficie total de 1 m². Permite recargar sus baterías con los paneles solares cuando está en la superficie del agua y una vez cargadas se sumerge y navega recogiendo datos de los parámetros físico-químicos, después vuelve a subir a la superficie a recargar de nuevo y es cuando envía por radio los datos obtenidos a un centro de mando, en la **Figura 2.8** se pueden ver las partes del SAUV II.

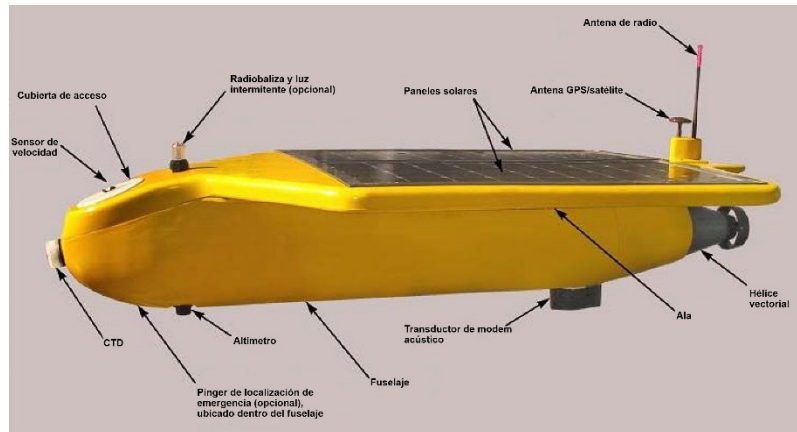


Figura 2.8: Partes del SAUV II. Imagen tomada de [33].

El vehículo contiene 3 baterías conectadas en paralelo, de 8 celdas cada una, conectadas en serie, de iones de litio, para obtener una tensión de 32 V y una capacidad de 2 kWh, donde se almacena la energía durante el día para ejecutar las misiones durante la noche. Este SAUV fue diseñado para llevar a cabo misiones de larga duración, (sobre un mes), como monitoreo, vigilancia y/o mantenimiento de sistemas sumergibles.

Este SAUV II dispone de sensores de conductividad, temperatura, presión y salinidad, lleva un altímetro, sensor de cabeceo, balanceo y rumbo (mediante un inclinómetro y una brújula magnetómetro), lleva también una radiobaliza y luz intermitente para su localización. Utiliza varios actuadores accionados con motores de CC, uno para la propulsión horizontal mediante una hélice vectorial situada en la popa y otro para la propulsión vertical.

Lleva un dispositivo para medir su velocidad, consistente en una rueda de paletas giratoria con un detector de efecto Hall, como un encoder, que, al desplazarse el vehículo, la rueda gira proporcionalmente a la velocidad del agua.

Cuando el vehículo está en la superficie envía señales de comunicación formato NMEA (Asociación Nacional de Electrónica Marina) y la posición del vehículo se determina mediante una antena GPS situada en la parte de arriba en la popa.

Se comunica con una estación base mediante señales de radio a una distancia de unas 3 millas, permitiendo enviar comandos al SAUV II, recibir y descargar datos del mismo. Lleva también un teléfono satelital Iridium para comunicación desde cualquier parte del mundo a 2,4 Kbps.

Las limitaciones de este AUV son principalmente el aporte energético y el sistema de gestión de la carga y descarga de las baterías, además la monitorización de los parámetros de las baterías son propiedad y patente del fabricante de las baterías, por lo que no es posible modificar y utilizar adecuadamente esta información para gestionar la carga y descarga de las mismas.

La duración de sus misiones está limitada a unos 30 días, siempre y cuando haga buen tiempo, no esté nublado y sea en verano o esté en una latitud oceánica donde la duración diurna sea mayor a 10 horas, para que pueda recargar casi por completo sus baterías con los paneles solares.

Un nuevo tipo de vehículo se presenta en [34], se trata de un catamarán para exploración ambiental en Rhode Island, para estudios oceanográficos, en la **Figura 2.9** se puede ver una fotografía.

Tiene un tamaño de 11 metros de eslora y 5 metros de manga y puede ir a una velocidad de 2,5 m/s, puede aventurarse cerca de la orilla. Tiene varios sensores para capturar los parámetros físico-químicos del agua como la temperatura, la salinidad, la fluorescencia de la clorofila, el oxígeno disuelto, la turbidez, los nutrientes, la óptica, etc.

Utiliza un GPS para saber su posición y el control mediante dos CPU basadas en Linux y un sistema operativo Windows. El sistema energético está compuesto por un Generador diésel de 5,5 kW, que acumula energía en 4 baterías de 12 V, que suministran energía a los motores eléctricos de 48 V.

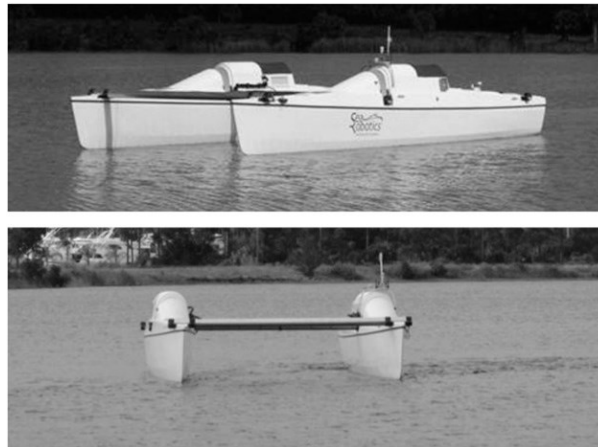


Figura 2.9: Catamarán SCOAP. Imagen tomada de [34].

Con este catamarán se han realizado exploraciones de zonas de aguas poco profundas, de una longitud de 15 a 20 km, realizando divisiones de la zona de entre 1 y 2 km, para identificar las variaciones de los parámetros físico-químicos del agua.

Las limitaciones principales de este catamarán son el tiempo de navegación que está limitado a unos 21 días y utiliza combustibles de origen fósil como el gasoil.

En [35] y [36] se describe un USV (Unmanned Surface Vehicle) bastante interesante, diseñado y construido para ampliar las misiones de investigación ambiental mediante el uso de un planificador de rutas de eficiencia energética mediante diagramas de Voronoi y un algoritmo de búsqueda Dijkstra.

Tiene una eslora de 4,2 metros y una manga de 2,4 metros y un peso de 350 kg. La embarcación está equipada con un GPS, un transpondedor AIS, reflectores de radar, sondas de profundidad y luces de navegación. Utiliza como fuente de energía 12 paneles solares de alta eficiencia, con un total de 1.200 Wp, un generador eólico de 720 W y un generador diésel de 2,5 kW para recargar las baterías.

Es propulsado mediante 2 hélices movidas por motores eléctricos, en la **Figura 2.10** se puede ver una fotografía.

Las limitaciones de este USV son principalmente: que el algoritmo utilizado es muy simple y no tiene en cuenta la energía solar generada para planificar la ruta más eficiente, además su tiempo de navegación está limitado a unos 3 meses.



Figura 2.10: EL USV C-Enduro. Imagen tomada de [35].

El catamarán descrito en el estudio [37] es un ASV solar, tiene dos motores eléctricos alimentados por dos paneles solares de 150 Wp, en la **Figura 2.11** se puede ver una fotografía.



Figura 2.11: El ASV Lake Wivenhoe. Imagen tomada de [37].

Este ASV se utiliza para realizar mediciones de los parámetros de la calidad del agua y emisiones de gases de efecto invernadero, para ello, está equipado con un conjunto de sensores de navegación que incluye un GPS, brújula, sensor de profundidad, cámara de video, detector óptico de metano (OMD), una sonda YSI (que mide la temperatura, la conductividad, la clorofila, la turbidez, el oxígeno disuelto y la radiación incidente), sensor de viento y un sensor de evitación de obstáculos basado en láser.

Lleva un brazo que se introduce debajo del agua, que permite mediciones de hasta 5,5 metros mientras el vehículo está en movimiento, puede ir a una velocidad de entre 0,5 y 3 m/s.

Las limitaciones principales de este ASV es el tiempo de navegación reducido que apenas llega a 24 horas.

En [38] y [39] se describe otro ASV, que le llaman MicroVeGA, utilizado para estudios en aguas someras y batimétricas, incluye un software especialmente diseñado con sistemas integrados de navegación y adquisición de datos, en la **Figura 2.12** se pueden ver una fotografía del mismo.



Figura 2.12: Fotografía del MicroVeGA. Imagen tomada de [38].

Este ASV lleva un conjunto de sensores como un GPS, una cámara de superficie y otra sumergida para adquisición de video, detección ultrasónica de obstáculos, sistema de control

de temperatura, ecosonda de haz único, plataforma inercial, etc. Todo el sistema lo gestiona un microordenador OLInuXino, con un sistema operativo Linux.

Es propulsado por dos hélices movidas por dos motores eléctricos que reciben su energía de dos baterías de 7 Ah.

Este vehículo se utiliza principalmente para operar en zonas de aguas poco profundas, donde se han realizado varios experimentos en puertos y cerca de la costa, en el Golfo de Nápoles.

Las limitaciones principales de este ASV son su limitada energía almacenada en sus baterías, lo que le proporciona un tiempo de navegación de entre dos a cuatro horas, también es de reducido tamaño y frágil, es decir, realizar algún experimento en un mismo día y sacarlo del agua.

En el estudio de [16] el que también ha colaborado el autor de esta tesis sobre todo en la parte de gestión de la energía, se describe un sistema multi-vehículo basado en una combinación de ASV-UUV para el monitoreo de derrames de petróleo, “BUSCAMOS-OIL”.

Una de sus características sobresalientes es la incorporación de nuevas estrategias de control basadas en redes neuronales bioinspiradas para brindar adaptabilidad y robustez al ASV y UUV, de los que está compuesto, según se puede ver en la **Figura 2.13**.

Los dos vehículos están conectados por un cable umbilical, lo que les permite compartir energía y recursos informáticos. Con sus dos robots, la plataforma tiene la capacidad de monitorear grandes extensiones de mar, tanto en la superficie como debajo del agua.

Con las mediciones de la serie de suplementos, el sistema extrae los mapas de manchas de petróleo, con información sobre la ubicación, tamaño, extensión, dirección y velocidad del derrame. Para garantizar su suministro de energía, el ASV contiene seis paneles fotovoltaicos de 130 Wp cada uno, que recargan dos baterías de 28 V. También tiene un generador diésel para cuando no hay energía solar disponible.

Esta plataforma ahora se ha mejorado para llevar a cabo los estudios e investigaciones realizadas en esta tesis, que requieren una mayor autonomía energética. Se eliminó el generador diésel, se agregaron dos paneles solares más y se eliminó el submarino explorador, lo que redujo el consumo de energía, el peso y la fricción del agua, además, se cambió el sistema de control bioinspirado por una arquitectura de control de toma de decisiones mediante lógica difusa.

El barco ahora obtiene más energía de sus paneles solares, lo que permite misiones permanentes de navegación y exploración.

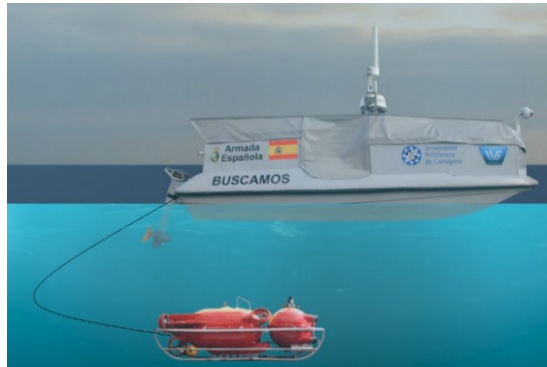


Figura 2.13: Sistema BUSCAMOS-Oil compuesto por un ASV y un UUV. Imagen tomada de [16].

Además de los AUV y ASV independientes, también hay otros enfoques que emplean flotas de AUV / ASV para monitorear y explorar los mares, lagos, pantanos y ríos. Cada vehículo gestiona individualmente sus fuentes de energía, pero como una flota de vehículos, estas soluciones ofrecen capacidades ampliadas para llevar a cabo las misiones.

En [40] se describe una serie de ASV solares para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero de plantas submarinas en reservorios interiores, ríos y marismas, en la **Figura 2.14** se puede ver una foto con cuatro de estos ASV realizando una exploración..



Figura 2.14: Varios ASV realizando una exploración en un lago de interior. Imagen tomada de [40].

Estos ASV utilizan un algoritmo de muestreo para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero como el metano en embalses interiores, ríos y pantanos, etc. Tienen unas dimensiones de 1,5 metros de largo y de ancho, con un peso de 33 kg, se desplazan mediante propulsores eléctricos sin escobillas, dispone de 2 paneles solares de 40 Wp, almacena la energía en una batería de respaldo de LFP (fosfato de litio y hierro) de una tensión de 12 Voltios, con una capacidad de 20 Ah, utiliza un algoritmo de navegación en el que todos los ASV se comunican entre sí.

Está equipado con sensores de navegación como GPS, bruja magnética con inclinómetro, sensor de profundidad, cuatro sensores de ultrasonidos colocados en la parte de arriba delante y detrás para detectar el borde del agua, árboles, cañas, ramas, etc., también lleva una cámara de vídeo para detectar obstáculos en su frente, todos ellos de bajo consumo.

Cada ASV tiene un ordenador a bordo Odroid C1 ARM Cortex-A5, de 1,5 GHz. Se comunican mediante red WiFi a 2,4 GHz a otra plataforma flotante, que se usa como repetidor, desde donde transmite en 3 G a una estación base.

Para minimizar el consumo de energía de una misión, se envían varios ASV (normalmente cuatro) a diferentes lugares de la zona a explorar. Para saber estos lugares donde inician la exploración, utilizan como referencia todos los sitios muestreados en representación con potencial gaussianos, y partiendo de una posición aleatoria dentro del agua con radio (r), haciendo iteraciones donde en cada iteración se aumenta un poco el radio (r), hasta que cada ASV, se le envía a una posición de muestreo, si durante las exploraciones encuentran un obstáculo o baja profundidad del agua modifican la trayectoria girando en sentido horario o antihorario, hasta sobrepasar el problema.

Las limitaciones principales de estos ASV son el aporte energético, sólo 80 Wp y la batería es de poca capacidad 240 Wh, apenas disponen de energía para moverse y poca potencia para enviar datos, además de solo poder operar en aguas interiores y la necesidad de utilizar varios de ellos para una misión con el coste que ello conlleva.

Otro ASV se describe en [41] consiste en un catamarán equipado con sensores como GPS, electrodos especiales para medir anomalías en la distribución de la resistencia eléctrica a lo largo de un canal, sensores de temperatura y oxígeno.

Según los autores, se puede usar para detectar y asustar a las aves lejos de las cuencas de agua potable y los estanques de cría de peces en acuicultura.

Sus dimensiones son 1,9 metros de eslora y 1,2 metros de manga, con un peso de 20 kg, está equipado con motores eléctricos para su propulsión, dispone de baterías recargables de alta densidad tipo LiPo.

Su sistema de control se basa en el sistema operativo Windows. En la **Figura 2.15** podemos ver una foto de este ASV.



Figura 2.15: Fotografía del ASV CatOne. Imagen tomada de [41].

Este ASV permite diferentes modos de operación: autónoma o manual dirigida por un operador por radio, también permite pasar de ASV a convertirse en una boya y quedar estático en una posición estratégica tomando información de sus sensores. Navega siguiendo una ruta proporcionada por las coordenadas gravadas en su ordenador de a bordo.

Puede realizar mediciones utilizando una estación Total LEICA en tierra y un prisma óptico Laser LEICA GRZ4 colocado a bordo del ASV.

Las limitaciones principales son el aporte energético que sólo le permite tener una autonomía reducida (hasta ocho horas), aunque puede ser ASV y boya como el vehículo que se estudia en esta tesis, no dispone de paneles solares para abastecerse de energía mientras navega, ni tampoco dispone de un sistema de control de la navegación, ni de la energía.

En el trabajo presentado en [42] presentan un velero autónomo para investigación de mamíferos marinos, mediante la monitorización acústica pasiva y estudiar la influencia de los humanos sobre ellos, lleva sensores para realizar estudios oceanográficos como hidrófonos, de profundidad, etc., para la medición de clorofila, la densidad del zooplanton, etc.

Para la navegación lleva brújula y GPS. En la **Figura 2.16** podemos ver al velero en plena navegación.

Este ASV tiene unas medidas de 3,75 metros de eslora, pesa 300 kg y puede llevar 50 kg más de carga, su vela mide 4,5 m². El aporte energético lo proporcionan los paneles solares de 285 Wp, lleva una pila de combustible de metanol de 65 W, se comunica con la estación base en tierra mediante WLAM, UMTS / GPRS y satélite Iridium.



Figura 2.16: Fofografía del ASV Roboat. Imagen tomada de [42].

Las principales limitaciones de este velero ASV son la limitación del aporte energético, sólo dispone de espacio para un panel solar, la propulsión mediante velas no tiene suficiente precisión para realizar exploraciones en una zona determinada, ya que depende de la velocidad y dirección del viento, tampoco dispone de un sistema de control de la energía.

En [43] se presenta un ASV/USV hidrográfico, para medidas batimétricas, que permite realizar mediciones del fondo marino en aguas poco profundas inferiores a 1 m. En la **Figura 2.17** podemos ver una foto de este ASV.

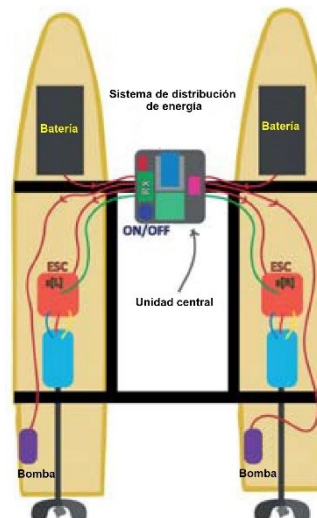


Figura 2.17: Fotografía del ASV CatOne. Imagen tomada de [43].

Ha sido probado en el embalse de Gdansk Morena, en Polonia, utiliza una ecosonda de 20-30 cm, para medir el fondo del mismo y obtener un estudio hidrográfico preciso.

Utiliza dos baterías de 12 V y un regulador de 5 V, pesa unos 20 kg, utiliza para su propulsión dos hélices movidas por dos motores de CC de 12 V.

Lleva sensores como acelerómetro, brújula electrónica, para tener un posicionamiento preciso y realizar levantamientos hidrográficos en torno a 1-2 cm, lleva un receptor GNSS, siendo un sistema de navegación global por satélite (GPS, GLONASS; BDS y Galileo).

Lleva un controlador a distancia marca Futaba R3006SB, los datos obtenidos son almacenados en una tarjeta SD para su posterior estudio.

Las principales limitaciones de este ASV son su limitada capacidad de las baterías, que sólo le permiten navegar durante unas horas, no lleva paneles solares, tampoco permite navegar muy lejos de la costa y necesita un operador que lo maneje a distancia mediante un sistema de mando teledirigido.

2.4 Conclusiones del estudio del estado del arte.

De estos estudios se obtiene la conclusión de que los vehículos operados a distancia (ROV), los vehículos autónomos subacuáticos (AUV) y los vehículos autónomos de superficie (ASV), utilizados tienen una serie de limitaciones:

- No pueden navegar en aguas someras, por lo tanto, no son apropiados para realizar exploraciones en aguas poco profundas.
- No disponen de suficiente energía para realizar misiones de larga duración, sólo disponen energía para navegar varias horas y como mucho algunas semanas, están limitados por sus baterías y sus paneles solares no son suficientes o no llevan.
- Cuando se deben cubrir grandes áreas, las operaciones específicas de despliegue temporal de estos drones en dichas áreas, deben planificarse y ejecutarse. El costo, en términos de tiempo y dinero, de tales operaciones es normalmente alto y en proporción al área a explorar.
- No disponen de un sistema de control de la navegación, ni de la energía.

Capítulo 3 Diseño de una arquitectura de control para ASVs-Boya en misiones de larga duración

3.1 Introducción.

En este capítulo se realiza el diseño de una arquitectura de control para ASVs que permita realizar aplicaciones de misiones de larga duración, para ello se definen los diferentes módulos, sistemas y componentes, con la capacidad para interactuar y comunicarse entre ellos y con el usuario.

Esta arquitectura debe ser capaz de implementarse en el vehículo híbrido denominado ASV-Boya utilizado en esta tesis, la cual debe posibilitar misiones de larga duración, gestionando su sistema de aporte energético y su sistema de navegación, mediante algoritmos de toma de decisiones, en la **Figura 3.1** se puede ver un esquema de un entorno por donde realiza las misiones el ASV-Boya.

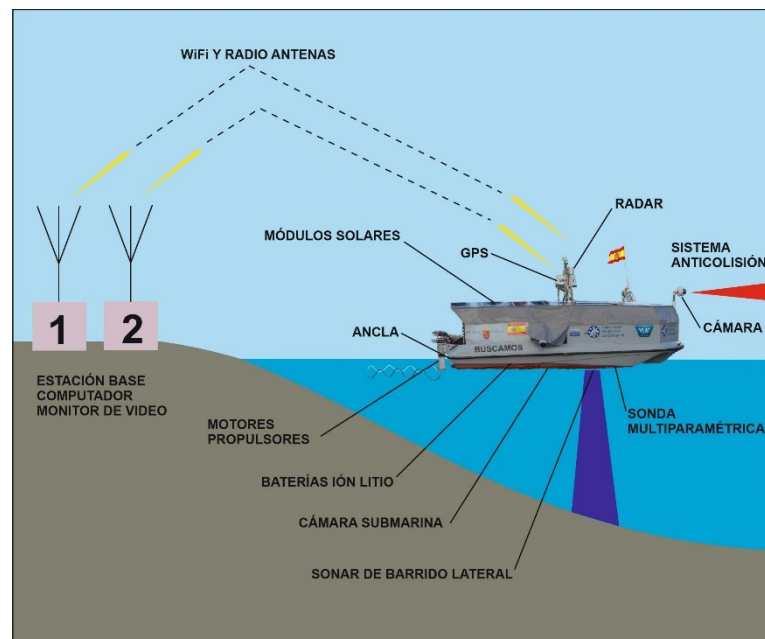


Figura 3.1: Esquema general.

Según la norma (IEEE, 2000) [44], la arquitectura de un sistema se define como la organización fundamental del sistema, incluyendo sus componentes, las relaciones entre ellos y el ambiente, los principios que gobiernan su diseño y evolución.

Básicamente una arquitectura se puede considerar como la definición que describe un sistema, los componentes que la integran, el comportamiento entre sus módulos internos, la interacción

con el mundo exterior y lo que es capaz de realizar en el entorno para el que ha sido diseñada [45].

Si retrocedemos en el tiempo, es desde los años 80 del pasado Siglo cuando se han desarrollado los principales paradigmas de arquitecturas de control, que hoy en día siguen utilizándose. Las que más se utilizan se describen en [46] (Nilson, 1980), [47] (Brooks, 1986) y en [48] (Brooks, 1991b).

La arquitectura diseñada en esta tesis tiene por misión cumplir los objetivos predefinidos por el usuario. La arquitectura utilizada es de tipo híbrida [49] (Arkin, 1998) y [50], y que combina una capa de tipo deliberativo sobre una capa de tipo reactiva, intentando aprovechar las ventajas de ambas. Así en una arquitectura híbrida el robot primero planea (razonamiento) la mejor forma de descomponer la misión a realizar en varias subtarear y selecciona los comportamientos adecuados para alcanzar cada subobjetivo. La ejecución se produce a continuación igual que el paradigma reactivo, ejecutando dichos comportamientos.

En la capa deliberativa de la arquitectura propuesta en esta tesis, las decisiones tomadas están basadas en el razonamiento y es donde se realizan y elaboran las planificaciones de rutas según los recursos disponibles y los objetivos globales de planificación de misión.

En esta arquitectura el nivel deliberativo está compuesto por dos capas o niveles de razonamiento, el Nivel Estratégico y el Nivel Táctico. Más adelante se explicará con detalle qué tipo de razonamientos se realizan en cada nivel

La capa reactiva está compuesta por funciones disparadas por eventos, se podría decir que primitivas, parecidas al comportamiento básico de los animales, donde hay una interacción más o menos directa entre los sensores y los actuadores. En la arquitectura propuesta en esta tesis, se denomina Nivel Operativo.

Para realizar el diseño de las capas reactivas de la arquitectura de control, se han tenido en cuenta las características propuestas en [51] (Alami, 1998) para controlar la navegación de un robot móvil que reacciona de manera oportuna a los eventos.

En la definición de la arquitectura de control propuesta en esta tesis, no sólo se han tenido en cuenta los requisitos funcionales del dominio de aplicación al que va definida, sino también una serie de requisitos no funcionales que garantizan su reusabilidad, adaptabilidad y robustez para la implementación en diferentes plataformas. Estos requisitos no funcionales serían:

Programabilidad: un robot móvil no puede ser diseñado para un solo entorno o tarea, debe ser programado en detalle. Debe ser capaz de lograr múltiples tareas descritas en un nivel abstracto,

es decir, debe ser capaz de navegar en diferentes entornos y cumplir diferentes objetivos. Sus funciones deben combinarse fácilmente de acuerdo con la tarea a ejecutar.

Autonomía y adaptabilidad: el robot debe poder realizar sus acciones y refinar o modificar la tarea y su propio comportamiento de acuerdo con el objetivo actual y el contexto de ejecución según lo percibido.

Reactividad: el robot debe tener en cuenta los eventos con límites de tiempo compatibles con el logro correcto y eficiente de sus objetivos (incluida su propia seguridad).

Comportamiento coherente: las reacciones del robot a los eventos deben ser coherentes y adecuadas según los objetivos y misiones establecidas.

Robustez: la arquitectura de control debe soportar la redundancia de las funciones de procesamiento de los datos. La robustez requerirá que el control esté descentralizado en cierta medida.

Extensibilidad: la integración de nuevas funciones y la definición de nuevas tareas debe ser fácil. Las capacidades de aprendizaje son importantes a considerar aquí: la arquitectura debería hacer posible el aprendizaje.

Además de cumplir los anteriores requisitos no funcionales, la arquitectura de control para un dominio específico de operación en aguas someras debe cumplir los requisitos específicos del diseño como son:

- Autonomía energética.
- Posibilidad de operar en aguas someras.
- Adaptabilidad para operar en diferentes entornos.
- Capacidad de realizar diferentes tareas y misiones.
- Adaptabilidad a ASVs de características constructivas diferentes.

Una vez que se implemente la arquitectura en el vehículo autónomo híbrido ASV-Boya, para realizar correctamente las misiones, gestionar la energía y la navegación es necesario que la arquitectura de control tenga cierta inteligencia y que sea capaz de tomar decisiones de forma autónoma sin la intervención humana. Para ello es necesario que gestione, analice grandes cantidades de datos recibidos en tiempo real y que se guarden en una base de datos, de acuerdo con ciertas reglas de conocimiento.

Como resultado de este análisis se obtiene qué zona, ruta y dirección es la más apropiada para explorar, teniendo en cuenta la autonomía energética disponible en ese momento, el tiempo que

hace que no se explore la zona y los posibles obstáculos o imprevistos a los que tenga que reaccionar.

3.2 Estructura jerárquica por capas de la arquitectura.

Tal como se ha especificado en el apartado anterior, la arquitectura de control diseñada es de tipo híbrida, que combina una capa deliberativa dividida en dos niveles el Nivel Estratégico y el Nivel Táctico sobre una capa reactiva Nivel Operativo. Así, se puede hacer una representación genérica del esquema del sistema de control está estructurado en tres niveles, como se muestra en la **Figura 3.2**:

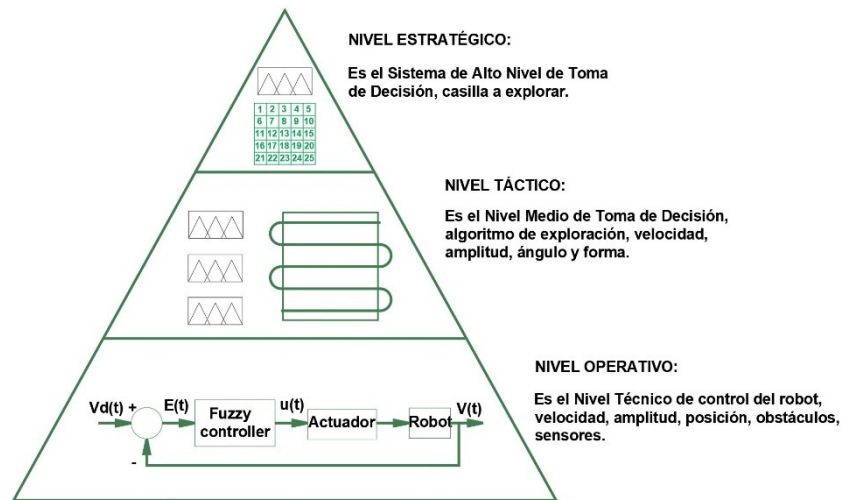


Figura 3.2: Estructura jerárquica de la arquitectura de control, mostrando los tres niveles de control: Estratégico, Táctico y Operativo.

Nivel Estratégico: representa el primer nivel de la capa deliberativa, en el que se ha implementado un sistema de toma de decisiones de alto nivel, con comportamientos de razonamiento en base a las reglas de conocimiento que previamente se le han introducido.

Permite el análisis de los datos recibidos de las capas inferiores para su tratamiento y posterior estudio, de acuerdo con los parámetros físico-químicos experimentales medidos del entorno ambiental por el que navega el robot.

La toma de decisiones de este nivel consiste en decidir cual es la casilla o área más importante para ser explorada, para ello necesita analizar los valores de los parámetros físico-químicos sometidos a los criterios definidos en las reglas de conocimiento, mediante razonamientos semejantes a los del ser humano, de manera que se define el nivel de importancia o de contaminación de cada una de las casillas o áreas en las que se ha dividido la zona que se pretende explorar.

Para que la toma de decisiones sea lo más precisa posible se necesita saber la distancia que existe entre la casilla o área donde se encuentra el ASV-Boya hasta cada una de las demás casillas y el tiempo que ha transcurrido desde que se realizó la exploración de cada una de las casillas, de esta manera, con los valores de estas tres variables son las que este nivel tiene en cuenta para decidir qué casilla es la más importante para ser explorada.

Nivel Táctico: forma el segundo nivel de la capa deliberativa, consiguiendo un sistema distribuido de control donde se reparten las tareas a realizar.

En este nivel se implementará un sistema de toma de decisiones, para permitir el razonamiento del control del comportamiento del robot, a nivel de control de los parámetros de la misión, como la velocidad de navegación, el tiempo y la forma de realizar la misión.

También incorpora un gestor inteligente de la energía del ASV-Boya. Este nivel procesa la información procedente del “Nivel Operativo”, a su vez se comunica con el “Nivel Estratégico”.

En este nivel se toma la decisión más adecuada para definir el comportamiento que debe realizar el ASV-Boya en cada momento, para ello tiene en cuenta la energía de que se dispone, de las condiciones climatológicas y la hora del día, esas variables son sometidas a los criterios establecidos en las reglas de conocimiento y se define lo que debe hacer la embarcación como parar y echar el ancla, pernoctar, recargar las baterías, navegar de una casilla a otra, explorar la casilla que le ha comunicado el “Nivel Estratégico”, a la velocidad y forma seleccionada.

Nivel Operativo: es la capa reactiva de la arquitectura, que recoge la información procedente de los sensores y por un lado, los envía a las dos capas superiores y por otro, es capaz de actuar sobre los actuadores de forma autónoma, mediante la dualidad Percepción (Sentir) – Ejecución (Actuar) [48] está basado en funciones primitivas, es un nivel puramente técnico de bajo nivel, centrado en el control de navegación.

Este nivel controla el rumbo, la velocidad, el ángulo, etc., y analiza con los sensores para evitar obstáculos, protegiendo así al propio ASV-Boya y a los demás usuarios. El nivel de control operacional utiliza bucles de control de retroalimentación, sin necesidad de razonamientos complicados ni estructuras de datos complejas. Se comunica con los niveles superiores de manera bidireccional.

Una vez explicados los tres niveles o capas en las que se deberá distribuir la funcionalidad de la arquitectura, en los siguientes puntos se describen los subsistemas y componentes que englobarán la implementación de dicha funcionalidad requerida.

3.3 Descripción funcional de módulos de la Arquitectura.

En la **Figura 3.3** se puede ver el diseño por bloques de la Arquitectura de Control, donde se aprecian los tres niveles, el “Nivel Estratégico” y el “Nivel Táctico” se encargan de la toma de decisiones equivalentes a una capa deliberativa y el “Nivel Operativo” contiene los comportamientos reactivos de la arquitectura.

Se aprecia el interface IUNO (Interface for Underwater drOne) [52] que suele estar implementado en un ordenador para ser utilizado por un operador humano. Aunque no forma parte de la Arquitectura de Control, es necesario para la comunicación entre una estación base y el ASV-Boya. Permite enviar órdenes y comandos a la embarcación y también puede definir el funcionamiento manual donde la decisión de ir a una casilla para ser explorada la realiza un operario desde una estación base o automático donde la toma de decisiones es tomada por el ASV-Boya.

Cada uno de estos niveles se compone de una serie de subsistemas, denominados gestores (gestor estratégico, táctico, etc.), que engloban la funcionalidad que expresa esa denominación. Los subsistemas a su vez pueden incluir componentes que implemente la funcionalidad más concreta, como planificación, fusión sensorial, control, etc.

El flujo de la información y/o de datos se expresa por líneas discontinuas azules y las órdenes y/o comandos se representan por líneas sólidas negras.

En los apartados siguientes se describen las funciones de cada uno de estos niveles, subsistemas y módulos de que se compone la Arquitectura.

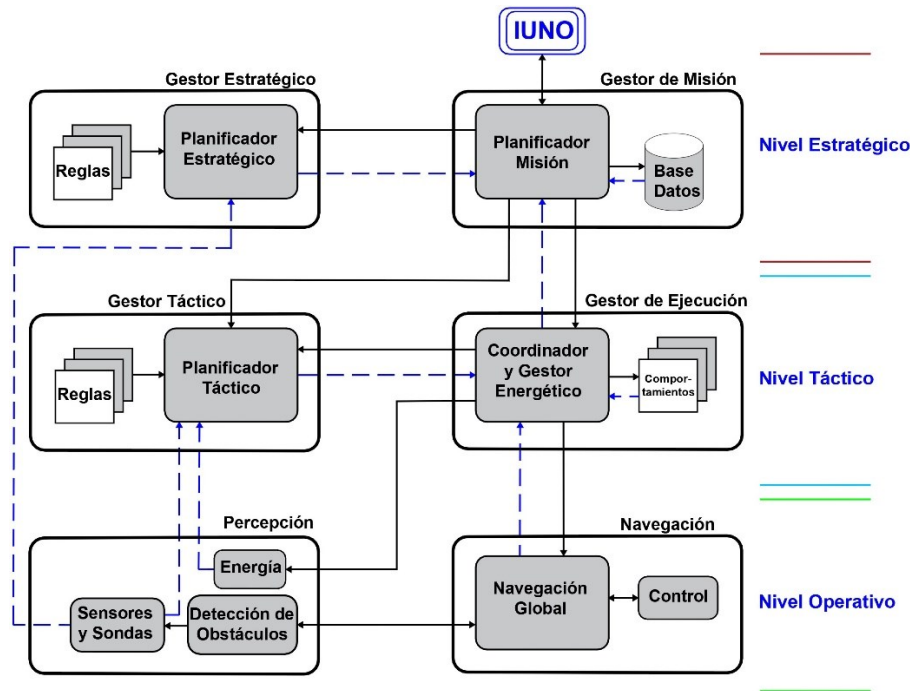


Figura 3.3: Diseño por bloques de la Arquitectura de Control. El flujo de la información y/o de datos se expresa por líneas discontinuas azules, las órdenes y/o comandos se representan por líneas sólidas negras y el sentido por la dirección de las flechas.

3.3.1 Nivel Estratégico.

El Nivel Estratégico está compuesto por los subsistemas “Gestor de Misión” y “Gestor Estratégico”.

3.3.1.1 Subsistema Gestor de Misión.

En este módulo establecemos e introducimos los parámetros de la misión a realizar, se define la zona a explorar mediante sus coordenadas, se configuran los parámetros de cómo se tiene que realizar la exploración o misión como la velocidad, longitud, distancias, superficie y duración, de manera que a partir de dicha información el ASV-Boya inicia la misión a realizar.

El usuario puede definir los parámetros de la misión a través de la interface de operador “IUNO” desde el exterior vía radio.

3.3.1.1.1 Planificador Misión.

Este módulo se encarga de recibir las órdenes y comandos de la interface “IUNO” y de activar la puesta en marcha del ASV-Boya en modo manual o automático. También se encarga de enviar órdenes y comandos al “Planificador Estratégico” para que le diga el número de casilla que se debe explorar en modo automático.

Cuando recibe el número de la casilla seleccionada comunica al módulo “Base Datos” que le diga las coordenadas de ésta. A continuación, envía estas coordenadas al “Coordinador y Gestor Energético” para que inicie la navegación de la embarcación y se dirija a la casilla con esas coordenadas, que es la seleccionada. También comunica al “Planificador Táctico” que debe iniciar su actividad de toma de decisiones.

3.3.1.1.2 Base Datos.

Este módulo contiene las coordenadas de todas las casillas de toda la zona que se desea explorar, así como la información de las fechas de cuando se realizaron las anteriores exploraciones de cada una de estas casillas. Estos datos están clasificados por orden cronológico y sirven para que, cuando el “Planificador Misión” tiene que enviar al ASV-Boya a explorar una determinada casilla, le pase las coordenadas y los datos almacenados. Además, cada vez que se realiza una nueva exploración, se van almacenando los nuevos datos obtenidos de los sensores y sondas, así como la fecha y hora en que se ha realizado la exploración.

En la **Figura 3.4**, se puede ver un caso de estudio donde el Mar Menor, en la región de Murcia, se ha dividido en 182 casillas de 1 Km de lado, al objeto de poder ser explorado por el ASV-Boya.

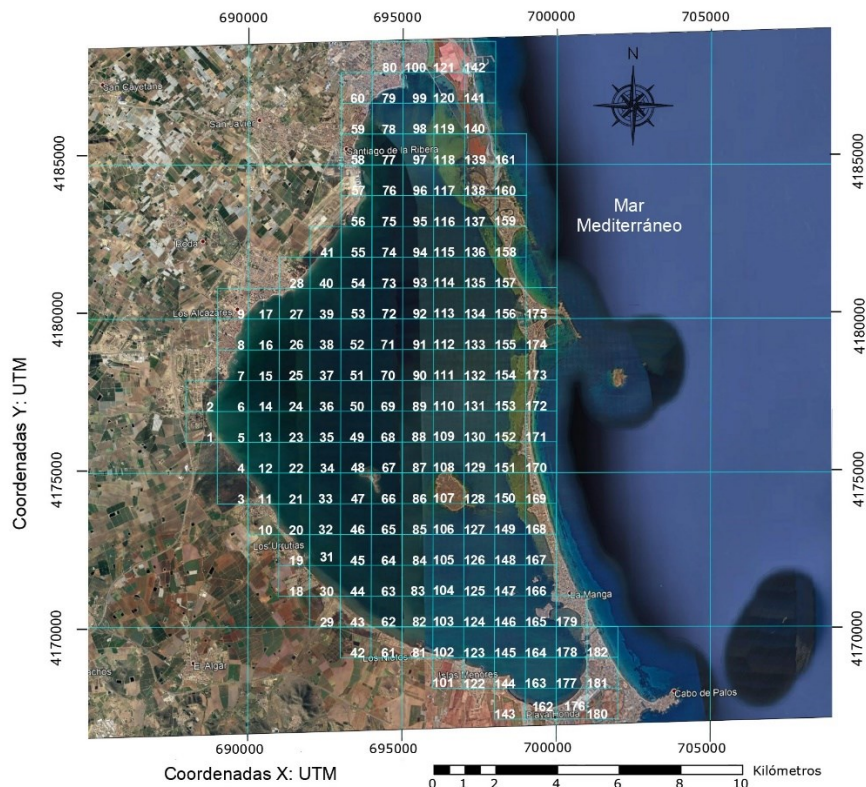


Figura 3.4: División del Mar Menor en casillas de 1 Km de lado con la numeración de cada una. Se representan las coordenadas UTM de X e Y.

3.3.1.2 Subsistema Gestor Estratégico.

Es donde se realizan los razonamientos principales para la toma de decisiones, se compone del “Planificador Estratégico” y de las “Reglas” de conocimiento estratégicas.

3.3.1.2.1 Planificador Estratégico.

Se compone de varios módulos, un módulo consiste en una toma de decisiones que aplica unas reglas con unos criterios a los valores de los sensores para obtener el nivel de importancia o contaminación de cada una de las casillas, valores recibidos del módulo “Sensores y Sondas”, para ello, se analizan los valores físico-químicos de los sensores obtenidos del entorno real u obtenidos mediante simulación.

Estos valores sirven para identificar el nivel de importancia de cada una de las casillas de la zona que se pretende estudiar mediante la exploración. Para visualizar esta importancia se ha optado por generar un gráfico en forma de mapa de tonos de colores de toda la zona a explorar, que se va actualizando en cada nueva exploración.

Otro módulo del “Planificador Estratégico” envía los nuevos valores medios de los parámetros físico-químicos obtenidos de cada casilla al “Planificador Misión”, éste guarda estos valores junto con sus coordenadas y la fecha del último registro en el módulo “Base Datos”, para que puedan ser usados para realizar las sucesivas exploraciones de una misión.

Las decisiones estratégicas tomadas por uno de los módulos del “Planificador Estratégico” consisten en seleccionar el área más adecuada para ser explorada teniendo en cuenta tres parámetros fundamentales: grado de interés (relacionado con el estado de las variables físico-químicas), la distancia de la ASV-Boya a otras casillas y el tiempo transcurrido desde la última exploración y medición.

Mediante la **ecuación (1)** se obtienen las reglas con sus criterios de conocimiento utilizadas para la selección:

$$\text{ÁreaInterés} = \frac{(\text{GradoInterés} + \text{InterésActual})}{\text{Distancia}} \quad (1)$$

Donde:

$$\text{GradoInterés} = \begin{cases} 24 \text{ (dos años)} & \text{si el estado del área es muy Malo} \\ 12 \text{ (un año)} & \text{si el estado del área es Malo} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$\text{InterésActual} = \text{Tiempo en meses desde la última medición}$$

3.3.1.2.2 Reglas.

Aquí es donde se introducen las reglas de conocimiento que han sido creadas por un experto. Se trataría de imitar al máximo posible la toma de decisiones de un navegador humano. Estas reglas se introducirían a mano en el sistema, pero podrían ser fácilmente modificadas y/o corregidas por el usuario y así el ASV-Boya podría usarse para diferentes escenarios de exploración y aprender y adaptarse a cada misión.

Las reglas tienen en cuenta los valores de cada una de las entradas provenientes de los “Sensores y Sondas” del subsistema “Percepción”, del “Nivel Operativo” o de un fichero de datos almacenado de valores históricos o generados de forma experimental.

Cuanto más reglas de conocimiento se introduzcan más precisa es la toma de decisiones.

Se crean reglas de conocimiento para ser usadas en el sistema de sensores y otras reglas de conocimiento para ser usadas en las decisiones estratégicas.

3.3.2 Nivel Táctico.

Es el nivel intermedio de la arquitectura de control, está compuesto principalmente por los subsistemas “Gestor de Ejecución” y el “Gestor Táctico”, que junto con el “Nivel Estratégico” forman un sistema distribuido de control, donde se reparten las tareas a realizar. En este nivel se implementará un sistema de toma de decisiones para el control de los parámetros de la misión, como la velocidad de navegación, el tiempo y la forma de realizar la misión e incorpora un gestor inteligente de la energía del ASV-Boya.

Para su correcto funcionamiento debe disponer de la información de la energía de que se dispone, de las condiciones climatológicas y la hora del día. Esas variables son sometidas a los criterios establecidos en las reglas de conocimiento y se define lo que debe hacer la embarcación como parar y echar el ancla, pernoctar, recargar las baterías, navegar de una casilla a otra o explorar una casilla.

3.3.2.1 Subsistema Gestor de Ejecución.

Está compuesto por el “Coordinador y Gestor Energético” y el de “Comportamientos”, que a continuación se describe cada uno de ellos.

3.3.2.1.1 Coordinador y Gestor Energético.

Es donde se gestiona la energía del ASV-Boya. Por un lado, recibe la energía capturada por los módulos solares y por otro va gestionando el consumo de cada sistema, controla la carga y descarga de las baterías, informa de la energía disponible en las baterías al módulo “Gestor

Táctico”. También se encarga de apagar o encender los diferentes sistemas y/o deja en stand by al ASV-Boya cuando está parado y recargando sus baterías o pernoctando o hay baja radiación solar.

Se implementarán en un mismo módulo la coordinación de la ejecución de comportamientos y la gestión energética. Para evitar que se pare o deje de funcionar el ASV-Boya cuando baja la energía disponible, es necesario cambiar el modo de comportamiento para evitar la descarga total de las baterías.

El “Coordinador” debe coordinar la información que le llega de los sensores colocados en las baterías, en los módulos solares y en los sistemas de consumo de la embarcación, esta información es enviada al “Gestor Táctico” para la toma de decisión y actúe en consecuencia.

Cuando a este módulo le llega la información con los datos del “Gestor Táctico” del modo de comportamiento que debe realizar el ASV-Boya, así como la velocidad y amplitud de la navegación, el “Coordinador” ejecuta las órdenes recibidas comunicando al módulo de “Comportamientos” lo que debe hacer.

3.3.2.1.2 Comportamientos.

Este módulo contiene una base de datos con varios comportamientos que se ejecutan según la información que recibe del módulo “Coordinador y Gestor Energético”. Permite seleccionar posibles comportamientos del ASV-Boya, como ir a casilla seleccionada, es decir, permite ir desde un punto A un punto B. También establece la forma de realizar la exploración de un área concreta, mediante trazados rectos de idas y venidas, variando la velocidad y separación o amplitud entre trazados y establece la manera de anclar cuando debe permanecer parado, recargando sus baterías o pernoctando.

Las variables que se utilizan son la amplitud y la velocidad de exploración. La distancia de estos trazados depende de la zona a explorar y de la misión. La amplitud y la velocidad la proporciona el subsistema “Gestor Táctico”.

3.3.2.2 Subsistema Gestor de Táctico.

Está compuesto principalmente por un sistema de toma de decisiones, sobre el que se hacen pasar las reglas de conocimiento tácticas establecidas. Los valores de su entrada proceden de los módulos “Energía” y “Sensores y Sondas”, del subsistema “Percepción”, también del módulo “Coordinador y Gestor Energético”. La información necesaria para su funcionamiento consiste en saber el nivel de carga de las baterías, del viento y oleaje.

3.3.2.2.1 Planificador Táctico.

Los valores de la carga de las baterías, del viento y oleaje son sus entradas. Después del análisis de estos valores, este “Planificador Táctico” obtiene tres salidas, que determinan el comportamiento del ASV-Boya, como son la Velocidad, Amplitud y modo de navegación, que van variando de manera periódica.

Utiliza un sistema de toma de decisiones, al que se le aplican las reglas con unos determinados criterios. A la salida de este sistema se obtienen tres valores, consistentes en la decisión táctica elegida, que, mediante el tratamiento adecuado, se convierten en valores numéricos del mundo real y expresan el valor de la velocidad, la amplitud y modo de navegación.

Las decisiones tácticas tomadas por este módulo consisten en variar la velocidad a la que debe navegar la embarcación, en el caso de explorar una casilla, expresar el valor de la amplitud o separación entre cada ida y/o venidas que se realicen de forma paralelas y establecer si la embarcación debe parar y echar el ancla para recargar las baterías y/o pernoctar.

3.3.2.2.2 Reglas.

Aquí es donde se introducen las reglas de conocimiento que han sido creadas por un experto, trata de parecerse lo máximo posible a la toma de decisiones de un navegador humano, estas reglas se introducen a mano en el sistema, pero pueden ser fácilmente modificadas y/o corregidas por el usuario y así el ASV-Boya puede usarse para diferentes escenarios de exploración y aprender y adaptarse a cada misión.

Las reglas tienen la forma: Si A es u y B es v y C es w, entonces D es x.

Las reglas tienen en cuenta los valores de cada una de las entradas provenientes de los sensores de radiación, carga de las baterías, oleaje, viento, etc., del “Nivel Operativo” o de un fichero de datos almacenado de valores históricos o generados de forma experimental.

Cuantas más reglas de conocimiento se introduzcan más precisa es la toma de decisiones.

3.3.3 Nivel Operativo.

Es el nivel más bajo de la arquitectura de control, como ya se ha especificado en apartados anteriores, este constituye la capa reactiva de la arquitectura de control, está formado principalmente por los subsistemas de “Navegación” y el de “Percepción”, y a su vez, cada uno de estos subsistemas están compuestos por una serie de módulos, componentes y/o elementos.

3.3.3.1 Subsistema de Navegación

Está compuesto por los módulos de “Navegación Global” y de “Control”.

3.3.3.1.1 Navegación Global.

Este módulo se encarga de llevar al ASV-Boya a la casilla seleccionada, haciéndole llegar las coordenadas del destino, así mismo, permite controlar la velocidad, dirección y sentido de la embarcación, necesita para su correcto funcionamiento del módulo “Control” y recibir información del módulo “Detección de Obstáculos”.

Este módulo en todo momento se comunica con el módulo “Detección de Obstáculos”, al objeto de evitar obstáculos fijos, otras embarcaciones, nadadores, islotes o entrantes en la costa, etc. Este proceso lo ejecuta mediante la navegación local, con el módulo “Navegación Global”, el módulo “Detección de Obstáculos” y módulo de “Control”, bien rodeando al obstáculo, reduciendo o aumentando la velocidad de navegación o parando al ASV-Boya.

3.3.3.1.2 Control.

El módulo se encarga de enviar la información y los datos con las instrucciones a los diferentes dispositivos actuadores.

El módulo también controla los motores eléctricos de propulsión, el motor de giro del timón y el motor del ancla, al objeto de mantener la velocidad y amplitud recibida para realizar la misión o pernoctar, se comunica con los dispositivos de electrónica de potencia.

3.3.3.2 Subsistema Percepción.

Este módulo tiene la misión de concentrar toda la información de todos los sistemas captadores de datos del exterior, del entorno y del medio ambiente que rodea al ASV-Boya. Se implementará en diferentes placas electrónicas compuestas por microcontroladores, circuitos electrónicos amplificadores, operacionales, diferenciales, reguladores de tensión e intensidad, transistores, etc.

3.3.3.2.1 Sensores y Sondas.

Es el módulo encargado de extraer la información de los distintos sensores y sondas destinados a captar los datos de los parámetros físico-químicos del agua y del entorno. Varios de estos sensores suelen estar alojados en una sonda multiparamétrica, otros se usan para medir la velocidad del ASV-Boya, lleva inclinómetro, giroscopio, anemómetro y nivel del balanceo u oleaje de la embarcación.

Para saber la ubicación en cada momento y poder navegar de forma autónoma se necesita la información procedente de la antena GPS y del radar.

El ASV-Boya también lleva sónar de barrido lateral y cámaras submarinas para estudios oceanográficos.

3.3.3.2.2 Detección de Obstáculos.

Para la detección de obstáculos lleva en su parte central cámaras láser anticolidión, que se encargan de ir en todo momento realizando un barrido de la superficie del mar para detectar algún obstáculo como obstáculos fijos, otras embarcaciones, nadadores, islotes o entrantes en la costa, etc., cuando detecta un obstáculo se le comunica al “Navegador Global” para actuar en consecuencia.

3.3.3.2.3 Energía.

Tal como se ha comentado en apartados anteriores el sistema energético para abastecer al ASV-Boya, está compuesto por una serie de paneles solares fotovoltaicos, reguladores de carga, inversor y sensor de radiación.

El modulo “Energía” presentado en la arquitectura es el encargado de extraer la información de estos paneles solares, valor de la radiación solar, nivel de carga de las baterías, consumos energéticos y de interactuar con los controladores para activar y/o desactivar diferentes dispositivos.

Este sistema lleva varios sensores de corriente no invasiva, utiliza transformadores toroidales con núcleos de ferrita, tipo pinza, que permite obtener el consumo de cada dispositivo actuador, además lleva sensores de tensión para monitorizar todos los valores de salida de las baterías.

En el Capítulo 5 se describen con más detalle este sistema generador, las baterías y sistema de carga.

3.4 Comportamiento de la arquitectura en la ejecución de una misión autónoma de exploración.

Una vez explicados todos los subsistemas y módulos de la arquitectura de control, en este punto se resume el típico flujo de control y de datos que se produciría en la ejecución de una misión autónoma de exploración.

En primer lugar, habría que definir la misión que se quiere realizar. Para ello se deben introducir los parámetros de la misión en el “Planificador Misión”. Se debe definir la zona del mar o de la

laguna que va a ser estudiada, mediante coordenadas UTM. a través de la interface de “IUNO”, que se puede ver en la **Figura 3.5**.

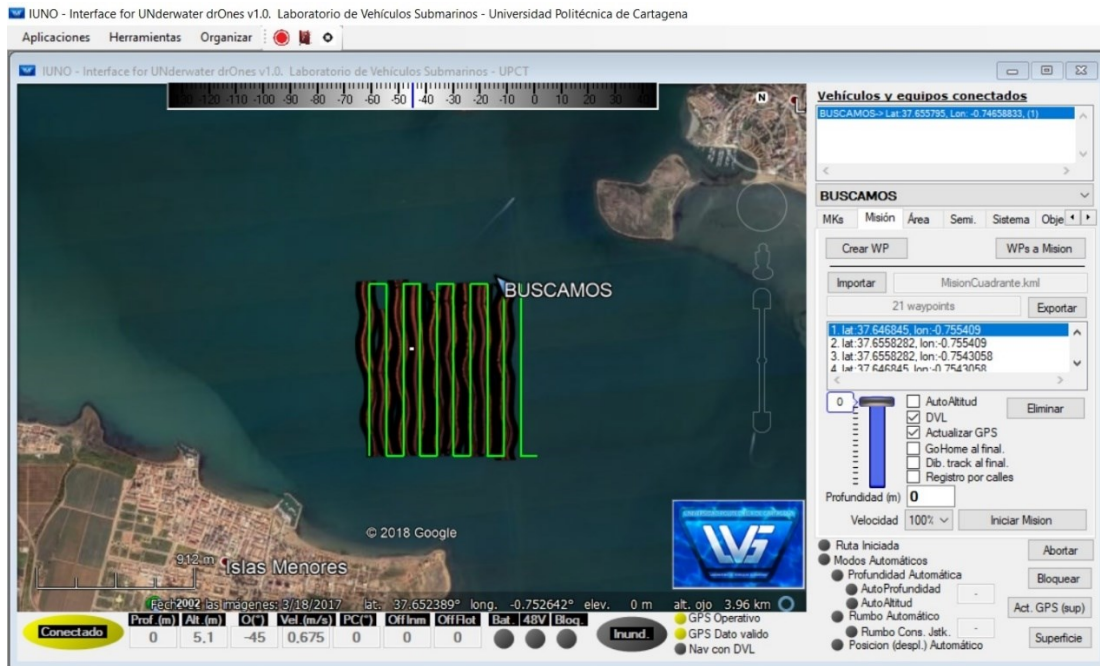


Figura 3.5: Imagen de IUNO, Interface for Underwater drOne, usado para introducir valores por un operario y enviar información a la embarcación ASV-Boya [52], donde se puede ver la trayectoria seguida en la exploración de una casilla.

Para verificar el comportamiento en un experimento cualquiera la zona a explorar se divide en áreas o casillas, al objeto de hacer las exploraciones más precisas, donde cada casilla debe estar georeferenciada mediante coordenadas de sus cuatro vértices, que se guardan en la “Base Datos”.

Se introduce la longitud, distancia y velocidad inicial que debe mantener el ASV-Boya en cada casilla explorada, también se define la duración de la misión y/o el número de casillas que se van a explorar, de esta manera se establece la precisión de la toma de datos por los sensores.

A continuación, se establecen las “Reglas” estratégicas de conocimiento del “Gestor Estratégico” donde se define el comportamiento de la arquitectura de control, según los valores de los sensores de los parámetros físico-químicos del agua o procedentes de un fichero almacenado en una base de datos.

Es conveniente establecer el mayor número de reglas para que abarquen todos los casos posibles de la toma de decisiones, de manera que se parezca lo máximo posible a la toma de decisión de un experto o piloto humano.

El “Gestor Estratégico” dispone de dos módulos de toma de decisiones, por lo tanto, necesita la creación de dos sistemas de “Reglas” estratégicas.

El primer sistema de “Reglas” contiene las reglas para hacer funcionar al sistema de sensores, que se utiliza para obtener los niveles de importancia de cada casilla según el nivel de contaminación.

El segundo sistema de “Reglas” contiene las reglas de conocimiento para el sistema de toma de decisiones estratégicas, necesario para obtener el número de casilla de mayor importancia para ser explorado.

Los valores medios de importancia obtenidos por el sistema sensores se hacen pasar por otro sistema de toma de decisiones, que se encuentra dentro del “Planificador Estratégico”, al que se le añaden también el valor de la distancia desde la casilla donde se encuentra el ASV-Boya hasta cada una de las demás casillas y el tiempo transcurrido desde que se realizó la última exploración y medición, valores obtenidos de la “Base Datos” previamente gravada.

Para que este segundo sistema de toma de decisiones funcione necesita aplicar las reglas de conocimiento estratégicas, así se obtiene en su salida, un valor real que corresponde con la casilla de mayor importancia a explorar.

El número de casilla a explorar es enviado al “Planificador Misión” que se comunica con la “Base Datos”, con el mapa numerado y georreferenciado de todas las casillas de la zona de estudio. A continuación, éste envía las coordenadas de la casilla seleccionada, la velocidad inicial y la ruta a seguir por el ASV-Boya al “Coordinador y Gestor Energético”, del “Gestor de Ejecución”, del “Nivel Táctico”.

La toma de decisiones tácticas se realiza en el “Gestor Táctico”, mediante el módulo “Planificador Táctico”, que recibe la información del valor de la energía disponible procedente del “Coordinador y Gestor Energético” y del estado de la mar, como el viento y oleaje, procedentes de los módulos “Energía” y “Sensores y Sondas”, del subsistema “Percepción”, del “Nivel Operativo”, datos obtenidos por sus sensores.

Para que este “Planificador Táctico” pueda funcionar necesita una tabla conteniendo las “Reglas tácticas de conocimiento, que han sido introducidas a mano por un experto navegador.

Una vez que este “Planificador Táctico” realiza la toma de decisiones, se obtiene en sus salidas los valores reales del comportamiento que va a seguir el ASV-Boya, como la velocidad de navegación, amplitud de separación entre exploraciones y la manera de realizar la navegación.

Estos valores son analizados por el módulo “Coordinador y Gestor Energético”, éste se comunica con los módulos de “Comportamientos” y decide qué va a realizar el ASV-Boya, puede ir desde donde se encuentra actualmente hasta la casilla seleccionada por sus coordenadas, puede realizar una exploración en zip-zap o idas y venidas o pararse y echar el ancla para recargar las baterías y/o pernoctar.

A continuación el “Gestor de Ejecución” envía los parámetros adecuados al “Navegador Global”, del subsistema de “Navegación”, del “Nivel Operativo”, que a través del módulo “Control” se encarga de activar los sistemas de propulsión, navegación, dirección, ancla, etc., y se comunica con el módulo “Detección de Obstáculos”, con los elementos GPS, cámaras de vídeo, sónar, etc., necesarios para llevar al ASV-Boya hasta las coordenadas de la casilla seleccionada y posteriormente realizar la exploración de la misma.

Todo este proceso es necesario para la toma de decisiones del “Nivel Táctico”, ya que dependiendo de la distancia que debe navegar, de la energía disponible en sus módulos solares, en sus baterías y del oleaje, la misión puede cambiar realizando paradas soltando el ancla para recargar sus baterías y comportarse como una boya, pernoctar por una o varias noches dejando todos sus sistemas en stand by, cambiar su velocidad y amplitud de la exploración, etc.

Para que el ASV-Boya pueda realizar misiones de larga duración necesita un “Gestor Energético” que gestione correctamente la energía procedente de los módulos solares y de las baterías.

De este comportamiento se deduce que durante el funcionamiento del ASV-Boya se realizan varios bucles de control dentro de la Arquitectura de Control **Figura 3.6**, un bucle de bajo nivel que lo forman el “Navegador Global” y “Control”, **Bucle 1**, de la **Figura 3.6**, que se encarga de navegar a la velocidad y dirección establecida y otro bucle intermedio, **Bucle 2**, de la **Figura 3.6**, que lo forman el “Coordinador y Gestor Energético”, el “Navegación Global”, la “Detección de Obstáculos”, los “Sensores y Sondas”, la “Energía” y el “Planificador Táctico”, que se encarga de analizar en todo momento la energía disponible, la detección de algún obstáculo en su trayectoria y los cambios climatológicos.

Existe otro bucle de alto nivel, **Bucle 3**, de la **Figura 3.6**, que se realiza en el “Planificador Misión” para si en cualquier momento se decide pasar a modo manual o se produce un evento como abandonar la misión actual e ir a otra casilla o realizar otra misión diferente.

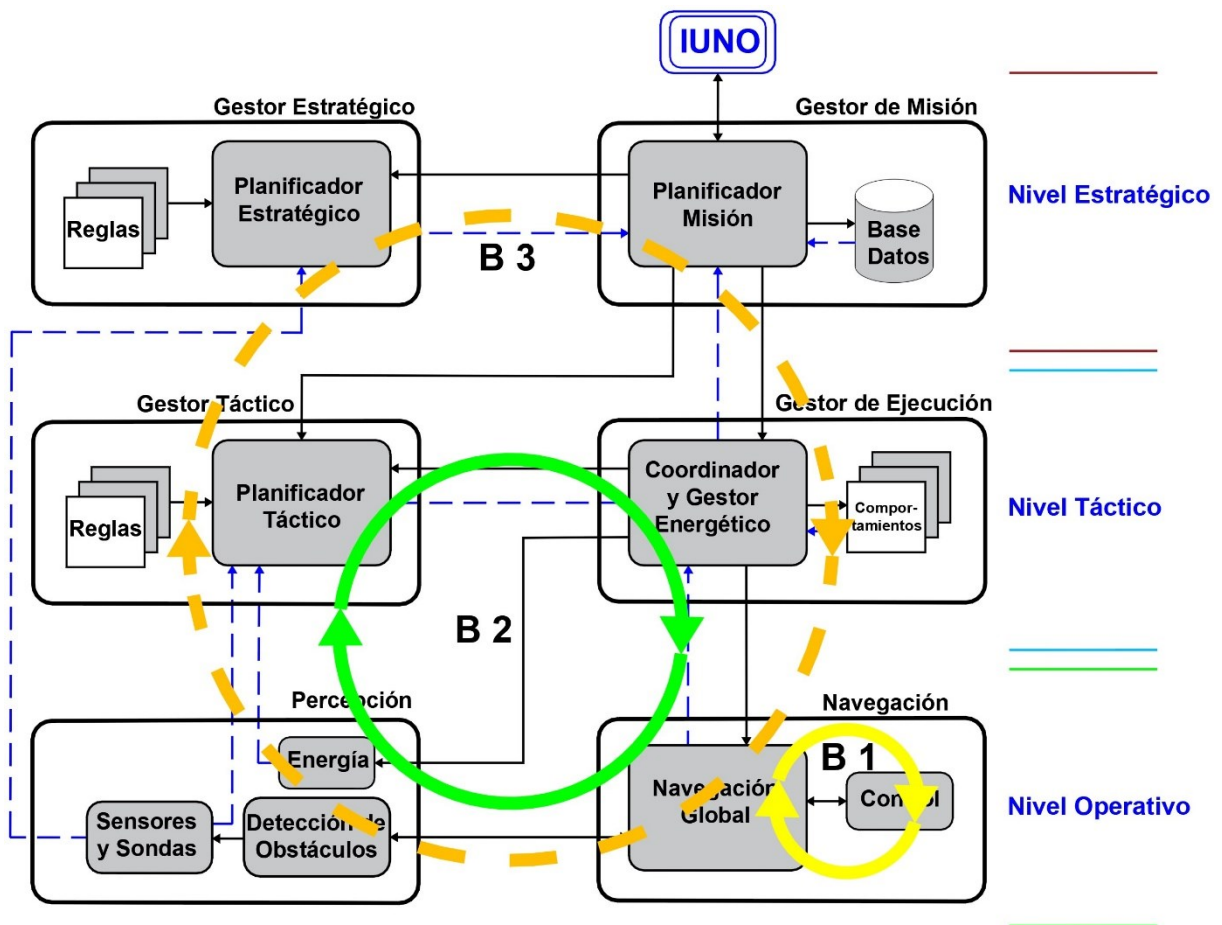


Figura 3.6: Bucles de control formados durante el funcionamiento de la Arquitectura de Control.

En el capítulo 4 se explica con más detalle el funcionamiento y comportamiento de la Arquitectura de Control, desarrollada con el programa de cálculo y simulación Matlab/Simulink, donde se han implementado los gestores de toma de decisiones mediante Lógica Difusa y Simulink.

Capítulo 4 Modelo de arquitectura de control

4.1 Introducción.

En el capítulo 3 se presentó de forma básica y esquemática la Arquitectura de Control, ahora en este capítulo se describe con más detalle y se presenta el Modelo creado e implementado en Simulink/Matlab.

En primer lugar, se describe el esquema por bloques que ofrece un detalle mayor que el presentado en el capítulo 3, puesto que se está instanciando para el vehículo ASV-Boya utilizado. Esta instancia de la arquitectura se implementará a continuación en Matlab, para validar su comportamiento, incluyendo los diferentes sistemas de Toma de Decisiones utilizados.

En el punto 3 se detallarán las funciones de membresía de entrada, las reglas de conocimiento introducidas, las gráficas y funciones de membresía de salida, además del modelo creado e implementado en Simulink que utiliza el entorno Fuzzy Logy [53] creado previamente.

En concreto, en el Nivel Estratégico se ha implementado un sistema de toma de decisiones de alto nivel con comportamientos de razonamiento en base a las reglas de conocimiento que se le han introducido, permite el análisis de los datos recibidos de las capas inferiores para su tratamiento y posterior estudio, de acuerdo con los parámetros físico-químicos experimentales medidos del entorno ambiental por el que navega el ASV-Boya.

En el Nivel Táctico se ha implementado un sistema de toma de decisiones, para permitir el razonamiento del control del comportamiento del ASV-Boya, es un control total de la misión, proporcionando variaciones en la misma, cambiando la velocidad de navegación, el tiempo y el algoritmo de exploración, incorpora un gestor inteligente de la energía del ASV-Boya.

El Nivel Operativo recordemos que es el que recoge la información procedente de los sensores, por un lado, los envía a las dos capas superiores y por otro lado es capaz de operar sobre los actuadores de forma autónoma.

El sistema controla el rumbo, la velocidad, el ángulo, etc. y analiza con los sensores para evitar obstáculos, protegiendo así al propio ASV-Boya y a los demás usuarios.

Aunque cada gestor de toma de decisiones se podría implementar con distintos algoritmos, en esta tesis se propone la utilización de la lógica difusa mediante el Fuzzy Logic Designer de Matlab.

También se ha implementado el modelo completo de arquitectura de control mediante Simulink, donde se han introducido los módulos de lógica difusa creados en Fuzzy Logic Designer.

4.2 Arquitectura de control.

En la **Figura 4.1** se puede ver un esquema gráfico de la Arquitectura de Control presentada en el capítulo 3, que se pretende utilizar en la simulación de un experimento real para validar su comportamiento.

Podemos ver las tres partes fundamentales de la Arquitectura de Control: El “Nivel Estratégico”, compuesto por los subsistemas “Gestor de Misión” y por el “Gestor Estratégico”, el “Nivel Táctico” compuesto por los subsistemas “Gestor de Ejecución” y por el “Gestor Táctico” y el “Nivel Operativo” compuesto por los subsistemas de “Navegación” y por el de “Percepción”.

Para validar el comportamiento de la Arquitectura de Control presentada es necesario realizar las simulaciones en un entorno lo más real posible del lugar donde se van a realizar las diferentes misiones. En este caso, la zona es la laguna costera denominada Mar Menor, donde el área que ocupa es dividida en casillas de 1 km de lado georreferenciadas mediante sus cuatro lados.

En la figura presentada, en la parte de arriba, se observa esta división en casillas del Mar Menor y se ha optado por utilizar un área más pequeña compuesta por 5 casillas de lado, en total 25, para realizar las primeras simulaciones.

Estas figuras divididas en casillas, representan dos de las entradas al “planificador estratégico”; por un lado, la salida del módulo “fusión sensores” con las casillas coloreadas según su interés o importancia para ser exploradas en función de la calidad del agua, desde el verde, con buena calidad hasta el rojo con peor calidad.

Por otro lado, la otra entrada al módulo “planificador estratégico” es la codificación del tiempo transcurrido en días desde que se hizo la última exploración en cada casilla. Con estos dos datos, una vez recibido el comando correspondiente del planificador de misión, el planificador estratégico genera el tercer mapa de casillas numeradas desde 1, indicando la posición actual del vehículo, 2 la siguiente casilla a explorar y así sucesivamente.

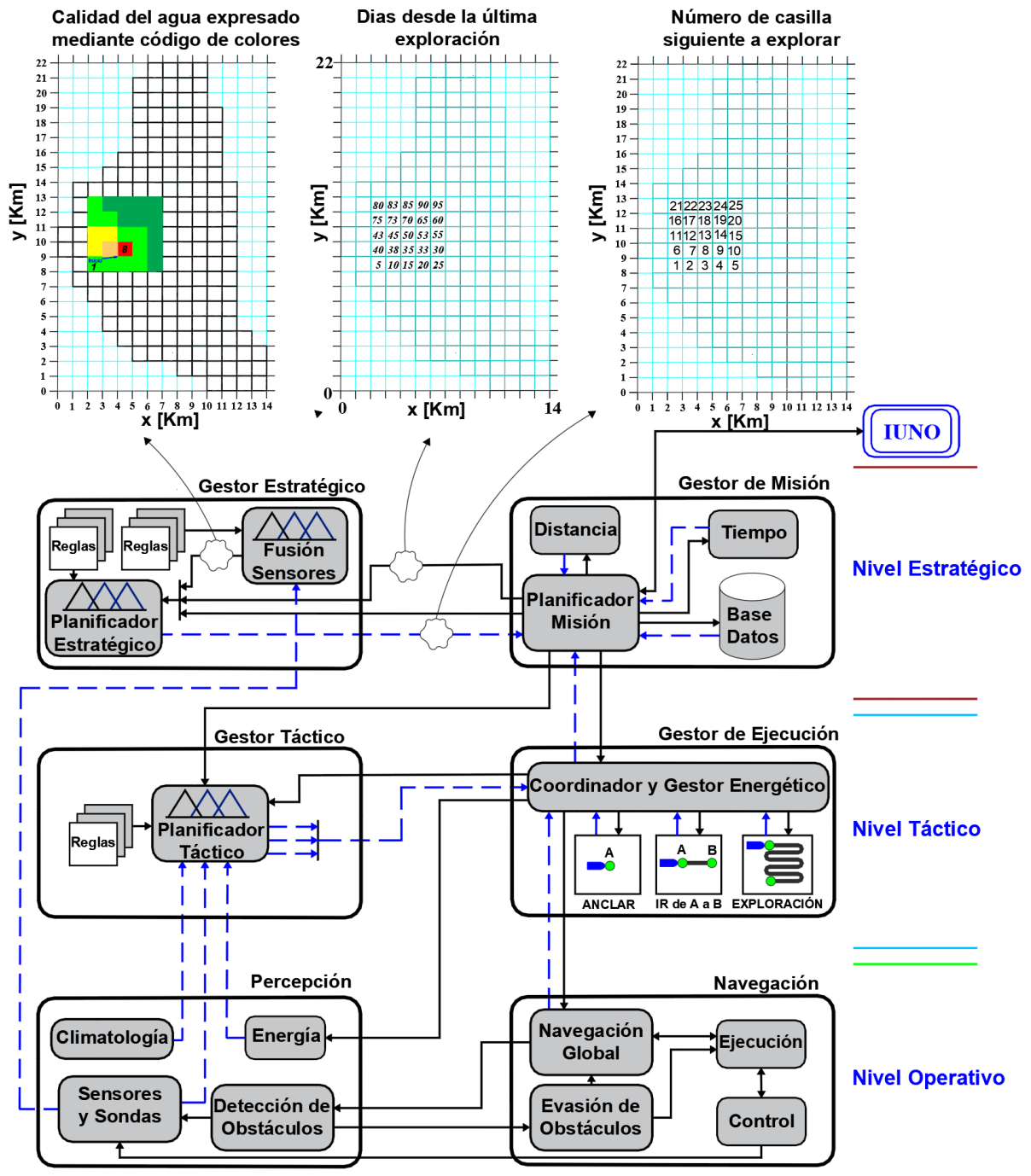


Figura 4.1: Esquema de bloques del modelo de Arquitectura de Control instanciado para el vehículo ASV-Boya.

Para realizar una misión de exploración, inicialmente la persona encargada de establecer la misión, introduce los parámetros de la misión, como las coordenadas del área de exploración, duración, velocidad y amplitud inicial a través del Software IUNO, ver **Figura 4.2**, ejecutándose, en una estación de operación base situada en tierra.

La interface IUNO (Interface for Underwater drOne) [52] que suele estar implementado en un ordenador para ser utilizado por un operador humano, aunque no forma parte de la Arquitectura de Control, es necesaria para la comunicación entre una estación base y el ASV-Boya. Permite enviar órdenes y comandos a la embarcación y también puede definir el funcionamiento manual donde la decisión de ir a una casilla para ser explorada la realiza un operario o de manera automática donde la toma de decisiones se realiza de forma autónoma por el ASV-Boya en función de los parámetros de tiempo transcurrido desde la última exploración en una zona, nivel de contaminación percibido en los últimos datos tomados, energía disponible, etc.



Figura 4.2: Sistema IUNO [52].

Cada uno de los niveles de que se compone la Arquitectura de Control está organizada en subsistemas, denominados gestores (gestor estratégico, táctico, etc.), que engloban la funcionalidad que expresa esa denominación. Los subsistemas a su vez pueden incluir módulos o componentes software que implementen la funcionalidad más concreta, como planificación, fusión sensores, control, etc.

El flujo de la información y/o de datos entre módulos se expresa por líneas discontinuas azules y las órdenes y/o comandos se representan por líneas sólidas negras y el sentido por la dirección de las flechas.

En los apartados siguientes se describen las funciones de cada uno de estos niveles, subsistemas y módulos.

4.3 Descripción del Nivel Estratégico.

El “Nivel Estratégico” representa el sistema de alto nivel de toma de decisiones, **Figura 4.3**, con comportamientos de razonamiento en base a las reglas de conocimiento que previamente se le han introducido. Permite el análisis de los datos recibidos de las capas inferiores para su tratamiento y posterior estudio, de acuerdo con los parámetros físico-químicos experimentales medidos del entorno ambiental por el que navega el ASV-Boya.

Este nivel lleva un subsistema “Gestor de Misión”, que se encarga de planificar la misión de acuerdo a la información recibida de IUNO, además contiene una base de datos con las coordenadas de todas las casillas que se van a explorar, la distancia entre ellas y el tiempo y/o fecha de la última exploración realizada.

La toma de decisiones que se realiza en el subsistema “Gestor Estratégico” consiste en determinar cuál es la siguiente casilla más importante para ser explorada. Para ello necesita analizar los valores de los parámetros físico-químicos del agua, que se obtienen mediante sensores colocados en la parte de debajo y en los laterales del ASV-Boya y dentro del agua como una sonda multiparamétrica. También pueden proceder de medidas realizadas por otras embarcaciones, boyas y tomadas a mano por científicos.

En este subsistema se define el nivel de importancia o de contaminación de cada una de las casillas en las que se ha dividido la zona que se pretende explorar, se obtienen los valores medios y con esos valores se grafica un mapa con las casillas coloreadas cuyos datos son necesarios para que el sistema tome la decisión de la casilla a explorar.

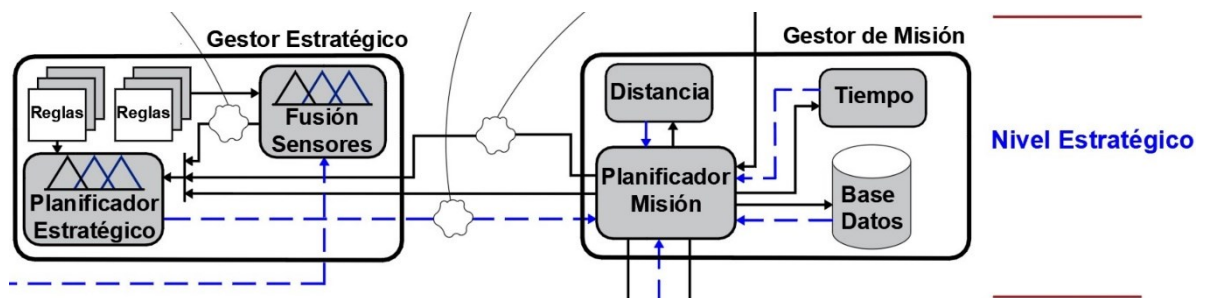


Figura 4.3: Subsistemas y módulos del “Nivel Estratégico”.

En la **Figura 4.4** se puede ver el subsistema “Gestor de Misión”, que contiene el módulo principal “Planificador Misión” que gestiona los tiempos transcurridos desde la última vez que se exploró una casilla mediante el módulo “Tiempo”, compara las distancias entre casillas

mediante el módulo “Distancia” y el módulo “Base Datos” contiene todos los datos de cada casilla en la que se ha dividido el área a explorar.

En este subsistema establecemos e introducimos los parámetros de la misión a realizar, se define la zona a explorar mediante sus coordenadas, se configuran los parámetros de cómo se tiene que realizar la exploración o misión como la velocidad, longitud, distancias, superficie y duración, de manera que a partir de dicha información el ASV-Boya inicia la misión a realizar.

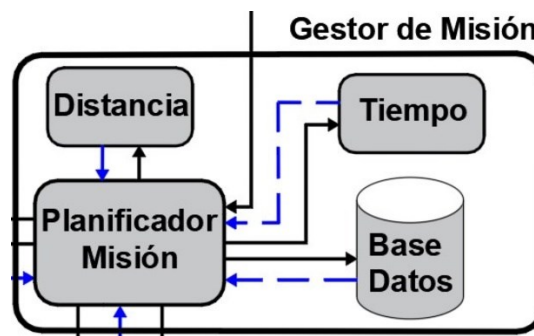


Figura 4.4: Subsistema “Gestor de Misión” y sus módulos internos.

El módulo “Planificador Misión” se encarga de recibir las órdenes y comandos de la interface “TUNO”, de activar la puesta en marcha del ASV-Boya en modo manual o automático, se encarga de enviar órdenes y comandos al “Planificador Estratégico” para que le diga el número de casilla que se debe explorar en modo automático.

Cuando recibe el número de la casilla seleccionada comunica al módulo “Base Datos” que le diga las coordenadas de ésta, las coordenadas las envía al “Coordinador y Gestor Energético” para que inicie la navegación de la embarcación y se dirija a la casilla con esas coordenadas, que es la seleccionada, también comunica al “Planificador Táctico” que debe iniciar su actividad de toma de decisiones.

El módulo “Base Datos” contiene las coordenadas de las cuatro esquinas de todas las casillas de toda el área que se desea explorar, así como la información de las fechas de cuando se realizaron las anteriores exploraciones de cada una de las casillas.

Los datos están clasificados por orden cronológico y sirve para cuando el “Planificador Misión” tiene que enviar al ASV-Boya a explorar una determinada casilla, disponga de las coordenadas y de los datos almacenados, además, cada vez que se realiza una nueva exploración, se van

almacenando los nuevos datos obtenidos de los sensores y sondas, así como la fecha y hora en que se ha realizado la exploración.

En el subsistema “Gestor Estratégico”, ver **Figura 4.5**, es donde se realizan los razonamientos principales para la toma de decisiones. Se compone del módulo “Planificador Estratégico”, con su módulo de “Reglas” estratégicas y del módulo “Fusión Sensores”, con su módulo de “Reglas” específico.

El módulo “Fusión Sensores”, es un sistema de toma de decisiones al que se le aplica unas reglas específicas con unos criterios, donde se hacen pasar los valores físico-químicos de los sensores obtenidos del entorno real u obtenidos mediante simulación, procedentes del módulo “Sensores y Sondas”, para obtener el nivel de importancia o contaminación de cada una de las casillas.

Estos valores sirven para identificar el nivel de importancia de cada una de las casillas del área que se pretende estudiar mediante la exploración, para visualizar esta importancia se ha optado por generar un gráfico en forma de mapa con las casillas coloreadas de toda el área a explorar, los colores se van actualizando en cada nueva exploración.

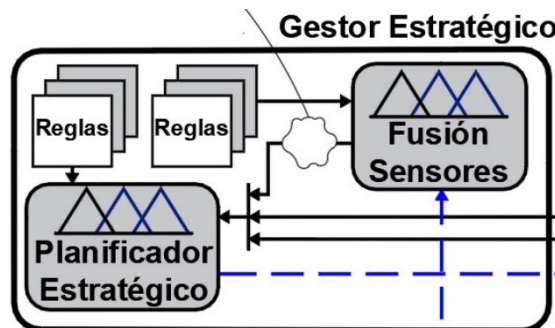


Figura 4.5: Subsistema “Gestor Estratégico” y sus módulos internos.

El valor medio obtenido con el módulo “Fusión Sensores” de cada una de las casillas se le entrega al módulo “Planificador Estratégico”. También recibe la información de los valores de la distancia entre la casilla donde se encuentra el ASV-Boya y las demás casillas y el tiempo de cuando se realizó la última exploración de cada casilla del módulo “Planificador Misión”.

Los tres valores se hacen pasar por el sistema de toma de decisiones, al que se le aplican reglas estratégicas con unos determinados criterios, por ejemplo, si en una determinada casilla se produce una alteración de alguno de los parámetros físico-químicos que se están midiendo, este valor alteraría el sistema de toma de decisiones y en base a la distancia hasta donde se encuentra

el ASV-Boya y a los días en que se exploró, el sistema puede tomar la decisión de elegir esta casilla.

En la salida del módulo “Planificador Estratégico” se obtiene un valor consistente en la decisión estratégica elegida, que representa el número de la casilla más importante a explorar y este valor se envía al “Planificador Misión”.

4.4 Descripción del Nivel Táctico.

Es el nivel intermedio de la Arquitectura de Control. Está compuesto principalmente por los subsistemas “Gestor de Ejecución” y el “Gestor Táctico”, **Figura 4.6**, que junto con el “Nivel Estratégico” forman un sistema distribuido de control, donde se reparten las tareas a realizar.

Dentro de este nivel se ha implementado un sistema de toma de decisiones para el control de los parámetros de la misión, como la velocidad de navegación, el tiempo y la forma de realizar la misión e incorpora un gestor inteligente de la energía del ASV-Boya.

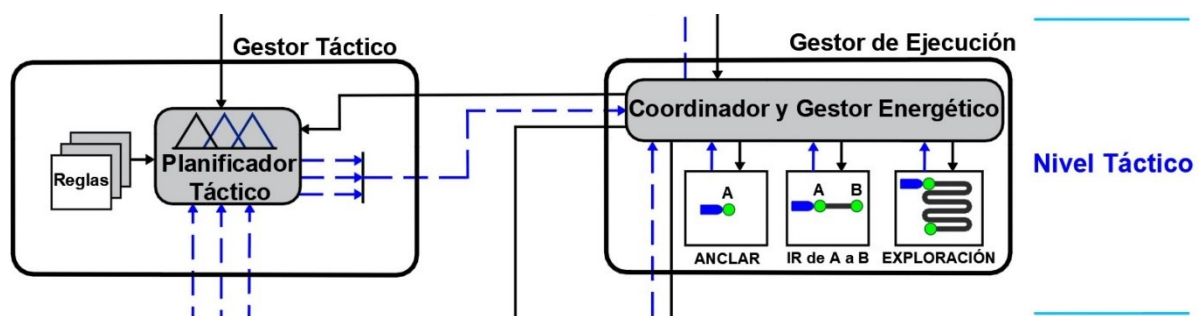


Figura 4.6: Subsistemas y módulos del “Nivel Táctico”.

El subsistema “Gestor de Ejecución”, **Figura 4.6 (derecha)**, se encarga de ejecutar la misión según la información que recibe del subsistema “Gestor de Misión” y del subsistema “Gestor Táctico”, selecciona el modo del comportamiento entre “Anclar”, “Ir de A a B” o “Exploración” e informa al “Nivel Operativo” para que detenga al ASV-Boya, inicie la navegación y/o explore una casilla.

Este subsistema, se encarga de ejecutar las órdenes recibidas del “Gestor de Misión”, que le ordena que debe ir a una determinada casilla, entonces el módulo “Coordinador y Gestor Energético” procede a informar al “Planificador Táctico” que le diga a qué velocidad debe realizar la navegación y si debe detenerse y echar el ancla para recargar las baterías o a pernoctar

según el nivel de carga percibido del sensor de energía de las baterías y la hora del día y cantidad de radiación solar disponible.

Después el “Coordinador y Gestor Energético” selecciona como comportamiento “Ir de A a B”, que consiste en ir a la casilla seleccionada. Si en algún momento baja el aporte de energía o se hace de noche, el “Coordinador y Gestor Energético” seleccionará el comportamiento de “Anclar”.

Una vez que el ASV-Boya ha llegado a la casilla seleccionada, de acuerdo con los datos recibidos del “Planificador Táctico”, procede a informar al subsistema de “Navegación”, que explore la casilla a la velocidad y amplitud establecida.

Los módulos “Anclar”, “Ir de A a B” y “Exploración” son módulos que contienen los algoritmos programados de los comportamientos, a falta de informar a qué velocidad y amplitud debe explorar o navegar el ASV-Boya.

El “Gestor Táctico”, **Figura 4.6 (izquierda)** lleva implementado un sistema de toma de decisiones con tres entradas y tres salidas. Las entradas son los valores de la energía disponible en las baterías, la climatología y la energía generada, que se hacen pasar por las reglas tácticas del módulo “Reglas”. Se obtienen tres salidas en el módulo “Planificador Táctico”, que son los valores de la velocidad, amplitud y modo de comportamiento, son enviados al “Coordinador y Gestor Energético”.

4.5 Descripción del Nivel Operativo.

Es el nivel más bajo de la arquitectura de control, como ya se ha especificado en apartados anteriores. Constituye la capa reactiva de la arquitectura de control. Está formado principalmente por los subsistemas de “Navegación” y el de “Percepción”, **Figura 4.7**, y a su vez, cada uno de estos subsistemas están compuestos por una serie de módulos o componentes hardware/software, que implementan la funcionalidad necesaria en cada subsistema

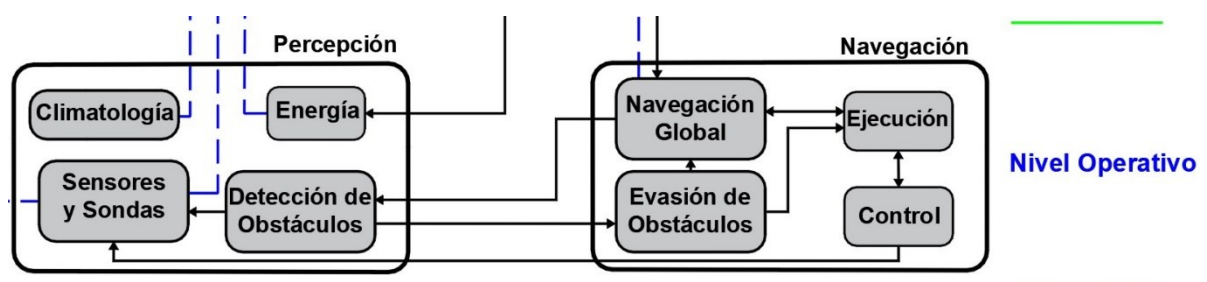


Figura 4.7: Subsistemas y módulos del “Nivel Operativo”.

En la **Figura 4.7 (derecha)**, podemos ver el subsistema “Navegación”, que está compuesto por los módulos de “Navegación Global”, “Ejecución”, “Evasión de Obstáculos” y de “Control”.

El módulo “Navegación Global” se encarga de recibir las órdenes del “Coordinador y Gestor Energético” para ejecutar la misión del ASV-Boya, como explorar una casilla, pernoctar, ir de una casilla a otra y/o echar el ancla, así como recibir información para evitar un obstáculo.

El módulo “Ejecución” envía la información al módulo de “Control” para que active los sistemas de propulsión y de control del ancla, además ejecuta la navegación local para evadir los obstáculos y mantiene al ASV-Boya a la velocidad y distancia establecida mediante la información recibida de los sensores del módulo “Evasión de Obstáculos”.

Con el módulo “Control” se activan los motores eléctricos de propulsión de la embarcación, motor del ancla, completando el sistema de navegación local, además de enviar la información necesaria a los diferentes actuadores como el motor de giro del timón.

El módulo “Evasión de Obstáculos” es el encargado de evitar obstáculos fijos, otras embarcaciones, nadadores, islotes o entrantes en la costa, etc., este proceso lo ejecuta mediante la navegación local con el módulo “Navegación Global”, el módulo “Evasión de Obstáculos”, el módulo “Detección de Obstáculos”, el módulo “Ejecución” y el módulo de “Control”, bien rodeando al obstáculo, reduciendo o aumentando la velocidad de navegación o parando al ASV-Boya.

En la **Figura 4.7 (izquierda)**, se pueden ver los módulos del subsistema “Percepción” que tiene la misión de concentrar toda la información de todos los sistemas captadores de datos del exterior, del entorno y del medio ambiente que rodea al ASV-Boya, se implementa en diferentes placas electrónicas compuestas por microcontroladores, sensores, circuitos electrónicos amplificadores, operacionales, diferenciales, reguladores de tensión e intensidad, transistores, etc.

El módulo “Sensores y Sondas” extrae la información de los distintos sensores y sondas destinados a captar los datos de los parámetros físico-químicos del agua y del entorno, varios de estos sensores suelen estar alojados en sondas multiparamétricas y otros se usan para medir la velocidad del ASV-Boya. Además, lleva una antena GPS, radar, sónar de barrido lateral y cámaras submarinas para estudios oceanográficos.

El módulo “Climatología” recibe la información de los sensores como del inclinómetro, giroscopio, anemómetro y nivel del balanceo u oleaje de la embarcación.

La detección de obstáculos se realiza a través del módulo “Detección de Obstáculos”, que recibe la información del escáner láser anticolidión, que se encargan de realizar en todo momento un barrido de la superficie del mar para detectar algún obstáculo fijo, otras embarcaciones, nadadores, islotes o entrantes en la costa, etc., cuando detecta un obstáculo se le comunica al “Navegador Global” para actuar en consecuencia.

Tal como se ha comentado en capítulos anteriores el sistema energético para abastecer al ASV-Boya, está compuesto por una serie de placas solares fotovoltaicas, reguladores de carga, inversor y sensor de radiación.

El modulo software “Energía” presentado en la arquitectura es el encargado de extraer la información de estas placas solares, valor de la radiación solar, nivel de carga de las baterías, consumos energéticos y de interactuar con los controladores para activar y/o desactivar diferentes dispositivos.

Este sistema lleva varios sensores de corriente no invasiva, utiliza transformadores toroidales con núcleos de ferrita, tipo pinza, que permite obtener el consumo de cada dispositivo actuador, además lleva sensores de tensión para monitorizar todos los valores de salida de las baterías.

4.6 Diagrama de flujo del comportamiento del modelo de Arquitectura de Control.

En la **Figura 4.1** se ha presentado el esquema de bloques del modelo de la Arquitectura de Control y en este apartado se describe el diagrama de flujo que resume el comportamiento del modelo implementado de la Arquitectura de Control, tal como se muestra en la **Figura 4.8**. Este diagrama de flujo representa el proceso seguido por las órdenes de control y datos, así como la toma de decisiones a la hora de realizar una misión para explorar una determinada zona.

Se observa que el proceso se inicia con la introducción de los datos iniciales en el software IUNO, a continuación se realiza la lectura de los datos proporcionados por los sensores o de un fichero donde van registrados los valores históricos almacenados, de los parámetros físico-químicos procedentes de exploraciones realizadas, además de los valores de los registros de la fecha de la exploración y las coordenadas georreferenciadas de las casillas a explorar del Mar Menor de la **Figura 4.1**.

Estos valores llegan al sistema implementado en lógica difusa “Fusión Sensores”, a la salida se obtienen los valores medios de cada una de las casillas, según su importancia o contaminación, sirven para trazar un mapa de tonalidades de colores para una representación gráfica.

Estos valores sirven también para llevarlos al siguiente sistema implementado en lógica difusa “Planificador Estratégico”, junto a los valores de fecha de exploración y distancia entre casillas,

en la salida de este sistema se obtiene un valor que corresponde con la casilla más importante a explorar.

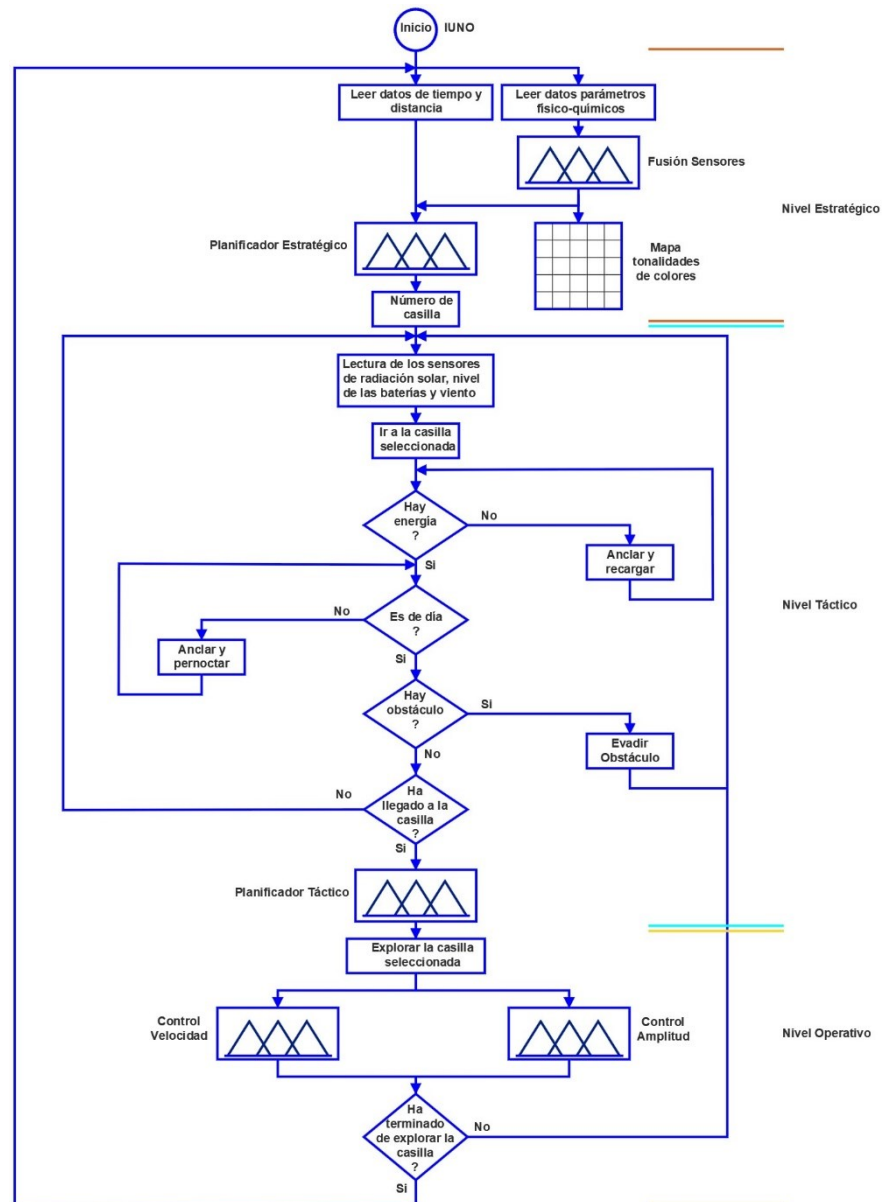


Figura 4.8: Diagrama de flujo de la Arquitectura de Control.

Internamente la Arquitectura de Control procede a comunicar al Nivel Táctico para que el ASV-Boya inicie la navegación hacia esa casilla seleccionada.

A continuación, se leen los valores de los sensores de radiación solar, el nivel de energía de las baterías, del viento y verifica que haya energía, si dispone de suficiente energía continua la navegación, si no, envía la información para parar y echar el ancla, para recargar sus baterías.

Una vez cargadas y obtenida la energía suficiente, verifica si es de día, si lo es, continua la navegación, si no lo es, para y echa el ancla para pernoctar hasta el día siguiente. Después analiza si hay algún obstáculo delante de la embarcación, si no lo hay, continúa la navegación, si hay algún obstáculo, lo evita.

Al amanecer, verifica si ha llegado el ASV-Boya a la casilla seleccionada, si ha llegado, pasa la información al “Planificador Táctico”, si no ha llegado, vuelve a verificar los valores de los sensores.

Una vez situado en la casilla seleccionada, procede a explorarla pasando la información por tres sistemas implementados en lógica difusa en el módulo “Planificador Táctico” y gestionados por el “Coordinador y Gestor Energético” como son el control de velocidad, amplitud y el Control del ancla, el algoritmo pregunta si ha terminado la exploración de la casilla, si es así, el proceso regresa al inicio para iniciar otra exploración.

4.7 Clasificación de la zona a explorar en casillas.

La laguna del Mar Menor es de una gran extensión y para optimizar los recursos tal como se ha comentado en el apartado 2, se decide dividir el Mar Menor en casillas de 1 km de lado, todas de iguales dimensiones, éstas fueron georreferenciadas por GPS, de manera que, a cada una se le corresponde con unas coordenadas UTM, estas coordenadas son guardadas en el módulo “Base Datos”, del ASV-Boya.

Por lo tanto para realizar este experimento del modelo creado se utiliza un área de 5 kilómetros de lado, tal como aparece en la **Figura 4.9**, en **a)** se pueden ver la numeración de las 25 casillas del área del mapa obtenido del Mar Menor, en **b)** las coordenadas en km de cada casilla y en **c)** el tiempo transcurrido desde que se exploró cada una de estas casillas.

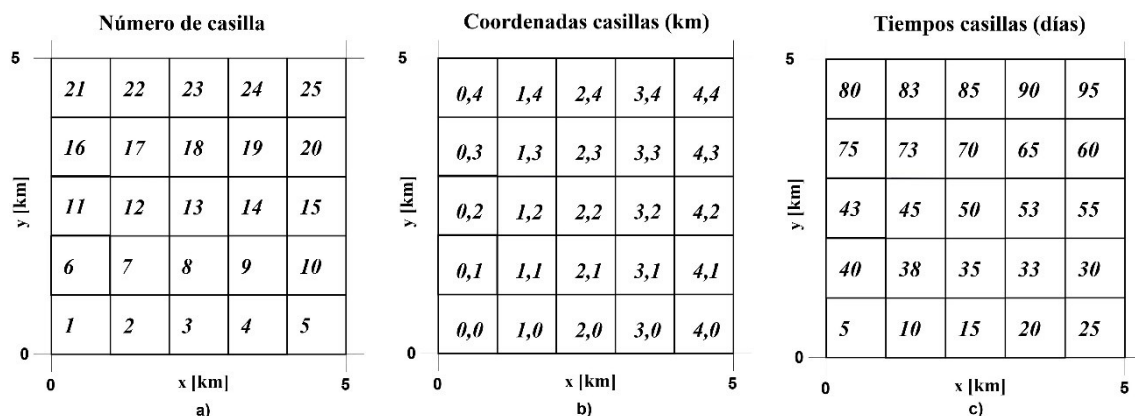


Figura 4.9: Zona del experimento dividida en 25 casillas con fines de exploración.

Los datos de las misiones de exploración previas (archivo histórico) también se mantuvieron, incluidos todos los parámetros medidos por los sensores a bordo u otras fuentes de información, estaciones fijas, mediante otros ASVs o recolección manual de datos. Estos parámetros incluyeron información ambiental, física, química y biológica. Todos los conjuntos de parámetros se etiquetaron con su ubicación geográfica, fecha y hora de adquisición.

4.8 Estrategia de clasificación de las áreas de interés.

El programa de planes estratégicos de la misión usó la información almacenada en el equipo en el módulo “Base Datos” para clasificar el estado de cada casilla. Para ello, cuenta con un algoritmo difuso cuyo aporte son la media de las muestras almacenadas de las variables de Temperatura, Salinidad, Densidad, Oxígeno, Clorofila y Nitratos de cada casilla (**Tabla 4.1**), obtenidos mediante la **Ecuación 1**:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

n es el número de muestras realizadas de cada una de las variables en una misma casilla.

\bar{x} es la media de las muestras realizadas de cada casilla.

Sobre la base de esta información, las casillas o zonas se clasificaron con el color específico de un estado difuso. Para realizar las simulaciones, los valores de los parámetros ambientales, físicos, químicos y biológicos de las 25 casillas se tomaron de una recopilación de datos tomados de forma manual anteriormente en algunas áreas representativas y se extrapolaron a las otras casillas.

Tabla 4.1. Valores teóricos de los parámetros físico-químicos, de cada una de las 25 casillas, que se han introducido al Sistema difuso “Fusión Sensores”.

Casillas	Temperatura (°C)	Salinidad (g/L)	Densidad (σ _t /L)	Oxígeno (mg/L)	Clorofila (µg/L)	Nitratos (mg/L)
1	22,4835	49,0195	1,0540	5,4330	0,5105	1,1015
2	20,7777	51,0362	1,0530	5,1375	0,5114	1,2273
3	20,9684	53,1196	1,0490	5,2736	0,5132	1,2144
4	22,6352	49,0289	1,0560	5,0424	0,5411	1,2162
5	18,8632	51,0328	1,0540	5,2084	0,5333	1,1416
6	19,0711	49,0180	1,0560	5,3628	0,5355	1,1016
7	19,1259	50,0543	1,0580	5,2615	0,5470	1,2461
8	21,2002	51,0443	1,0520	5,4930	3,5000	1,1382
9	19,0185	53,0573	1,0540	5,4926	0,5458	1,1456
10	19,3561	52,0076	1,0500	5,1636	0,5485	1,2070
11	19,0670	53,1659	1,0500	5,3583	0,5021	1,2333
12	19,2264	53,1315	1,0570	5,4432	0,5373	1,1327
13	19,9975	55,1828	1,0560	5,0772	0,5052	1,2146

14	19,9538	49,0828	1,0490	5,2773	0,5400	1,2391
15	19,3400	54,0481	1,0520	5,0703	0,5119	1,2199
16	18,5235	50,0737	1,0570	5,3765	0,5223	1,1049
17	19,6219	52,0323	1,0550	5,1491	0,5018	1,2129
18	19,8125	54,0197	1,0580	5,0279	0,5481	1,1134
19	22,8114	55,0032	1,0520	5,4420	0,5361	1,2094
20	19,1966	49,1596	1,0540	5,2283	0,5090	1,1068
21	18,2834	54,1230	1,0600	5,4132	0,5059	1,2406
22	19,3645	50,1542	1,0510	5,3254	0,5237	1,1027
23	22,4631	55,1280	1,0590	5,0148	0,5248	1,2475
24	18,2381	51,0717	1,0570	5,4753	0,5216	1,1108
25	18,8553	50,1209	1,0520	5,0224	0,5228	1,1463

En las gráficas de la **Figura 4.10** a la **Figura 4.15** aparecen los valores de cada uno de los parámetros medidos por los sensores del ASV-Boya.

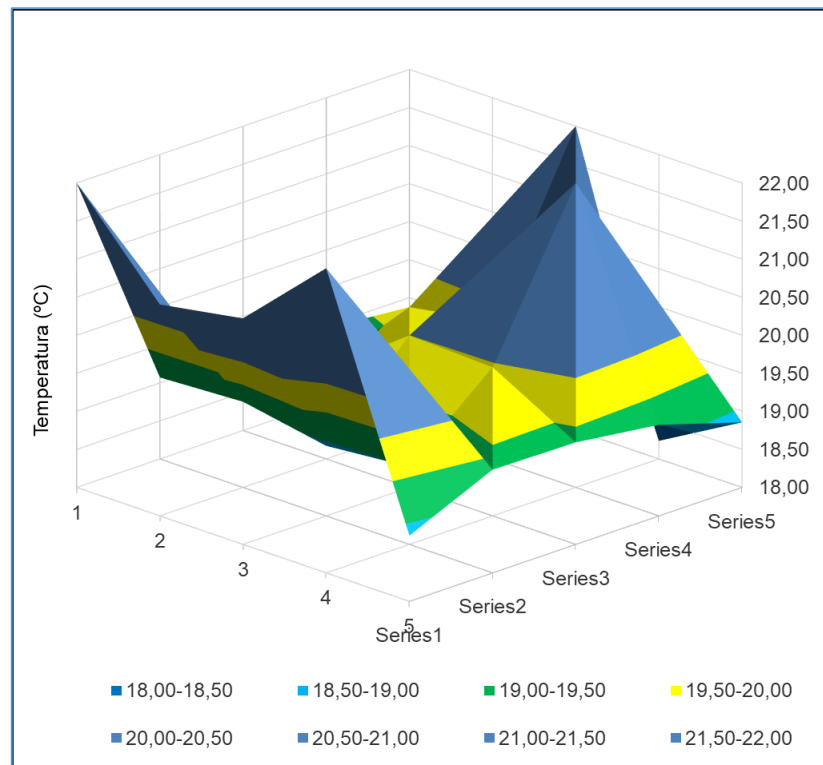


Figura 4.10: Valores teóricos de la Temperatura utilizados para la simulación.

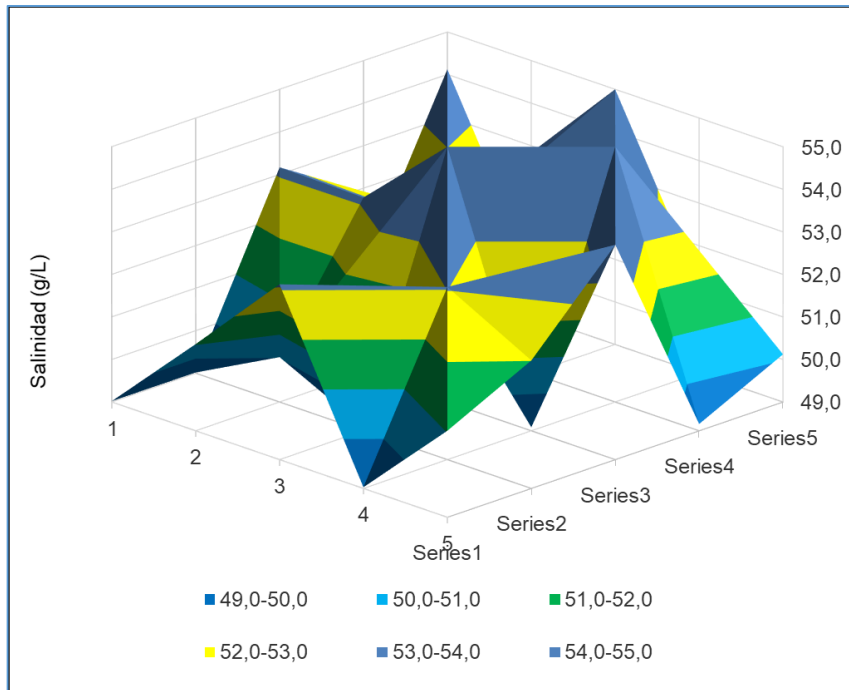


Figura 4.11: Valores teóricos de la Salinidad utilizados para la simulación.

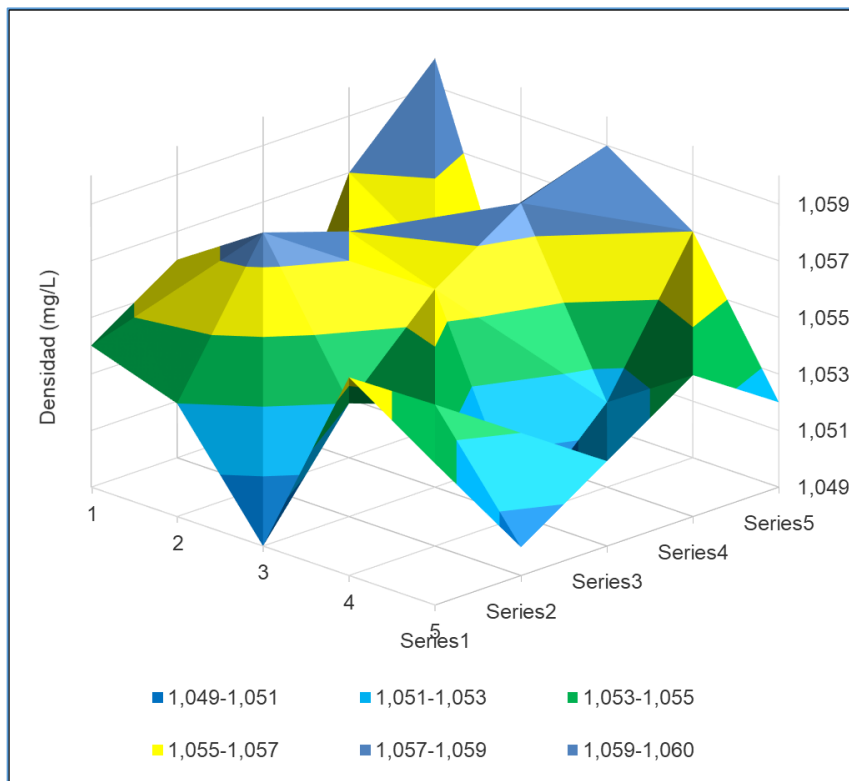


Figura 4.12: Valores teóricos de la Densidad utilizados para la simulación.

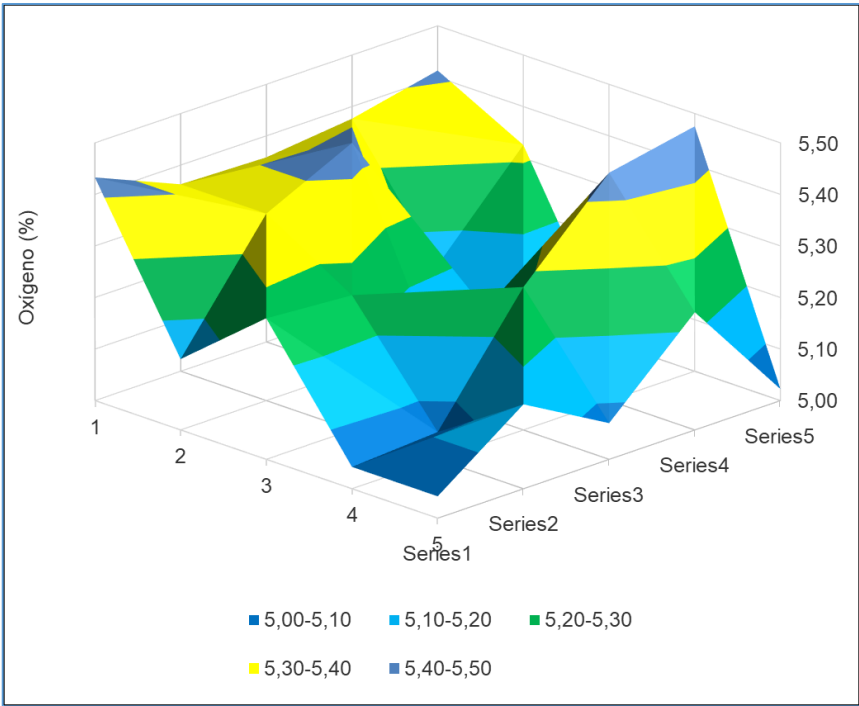


Figura 4.13: Valores teóricos del Oxígeno utilizados para la simulación.

El valor anómalo del Nivel de la Clorofila, de la casilla 8, de la Figura 4.14:, se agregó manualmente sólo para fines de simulación.

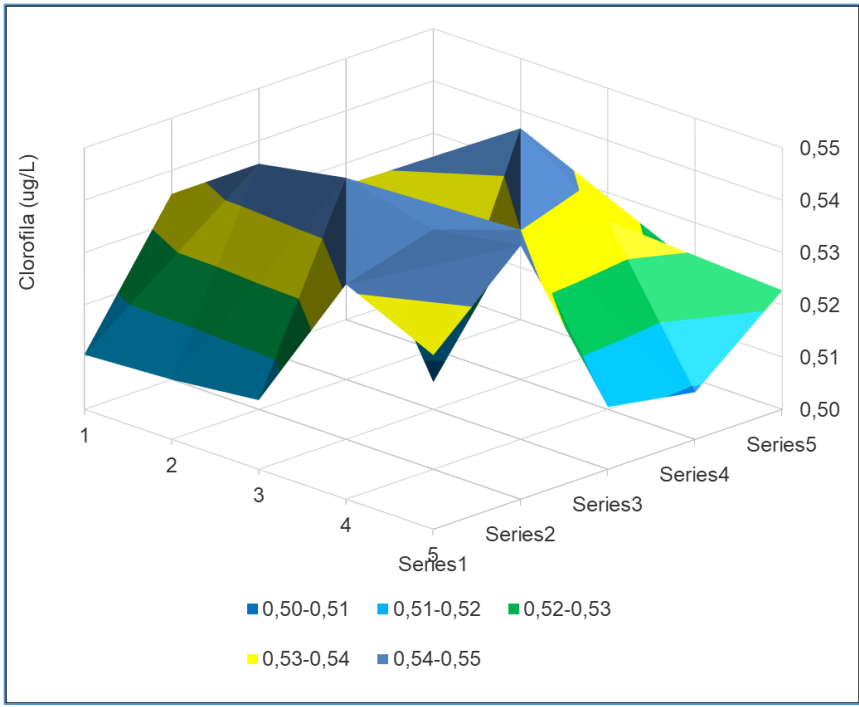


Figura 4.14: Valores teóricos de la Clorofila utilizados para la simulación.

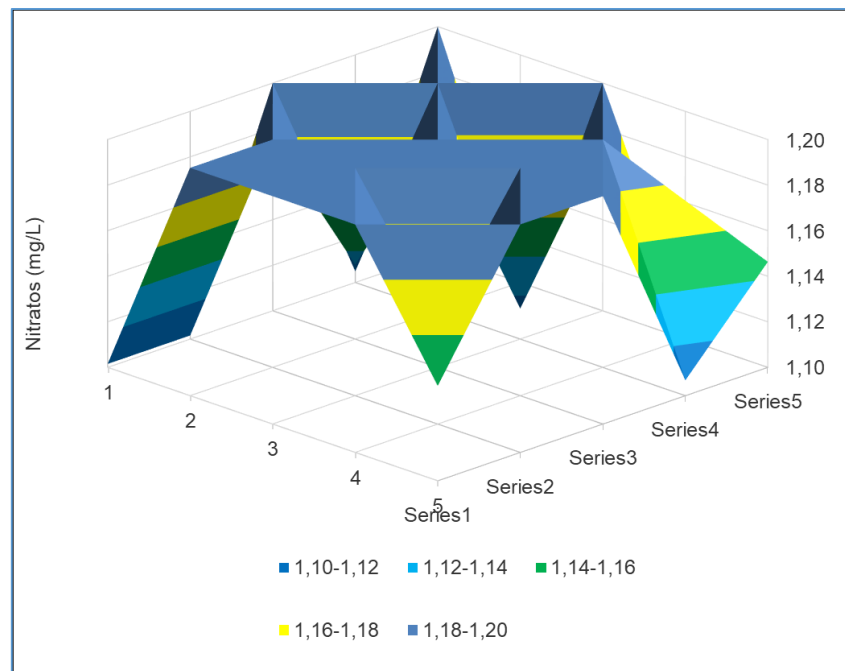


Figura 4.15: Valores teóricos de Nitratos utilizados para la simulación.

4.9 Modelo de Arquitectura de Control implementado en Matlab.

En el apartado 1, Introducción, de este capítulo se comentó que la Arquitectura de Control se va a implementar mediante un modelo creado en el entorno de programación de MATLAB/Simulink, para validar el funcionamiento de la misma.

Cada gestor de toma de decisiones se podría implementar con distintos algoritmos. En esta tesis se propone la utilización de la lógica difusa mediante el Fuzzy Logic Designer de Matlab. Para ello ha sido necesario crear varios ficheros ejecutables dentro del entorno de programación de Matlab, así como un fichero Excel conteniendo varias tablas con los datos necesarios para realizar las simulaciones.

Dentro del entorno de Simulink se ha implementado un modelo del “Nivel Estratégico”, un modelo del “Nivel Táctico” y modelos de los módulos de “Control”, donde se han introducido los módulos de lógica difusa creados en Fuzzy Logic Designer.

A continuación, se exponen estos modelos implementados, iniciando la exposición con el modelo creado en Simulink del “Nivel Estratégico”, con el sistema de toma de decisiones creado en lógica difusa.

4.9.1 Nivel Estratégico.

En el apartado 2 de este capítulo se ha descrito la Arquitectura de Control presentada en la **Figura 4.1**, donde el flujograma de la **Figura 4.8** establece los flujos seguidos de las órdenes y datos del comportamiento de la misma. En este apartado se describe el modelo de “Gestor Estratégico”, que se ha implementado en Simulink/Matlab utilizando los bloques que se presentan en la **Figura 4.16**.

Por un lado se introducen los valores de los 6 parámetros físico-químicos de la (**Tabla 4.1**), de la distancia entre casillas y el tiempo desde que se realizaron las exploraciones contenidos en la tabla de datos del fichero Excel, a través del bloque “Datos de entrada”, que es gestionado mediante el módulo “Planificador Misión”.

El modelo creado del “Gestor Estratégico” contiene dos bloques, un bloque denominado “Fusión Sensores” con el nombre del sistema “Fusión_Sensores.fis” y otro bloque “Planificador Estratégico”, con el nombre “Planificador_Estratégico.fis”, ambos bloques implementados mediante Fuzzy Logic Controller del Fuzzy Logic Toolbox, de Matlab.

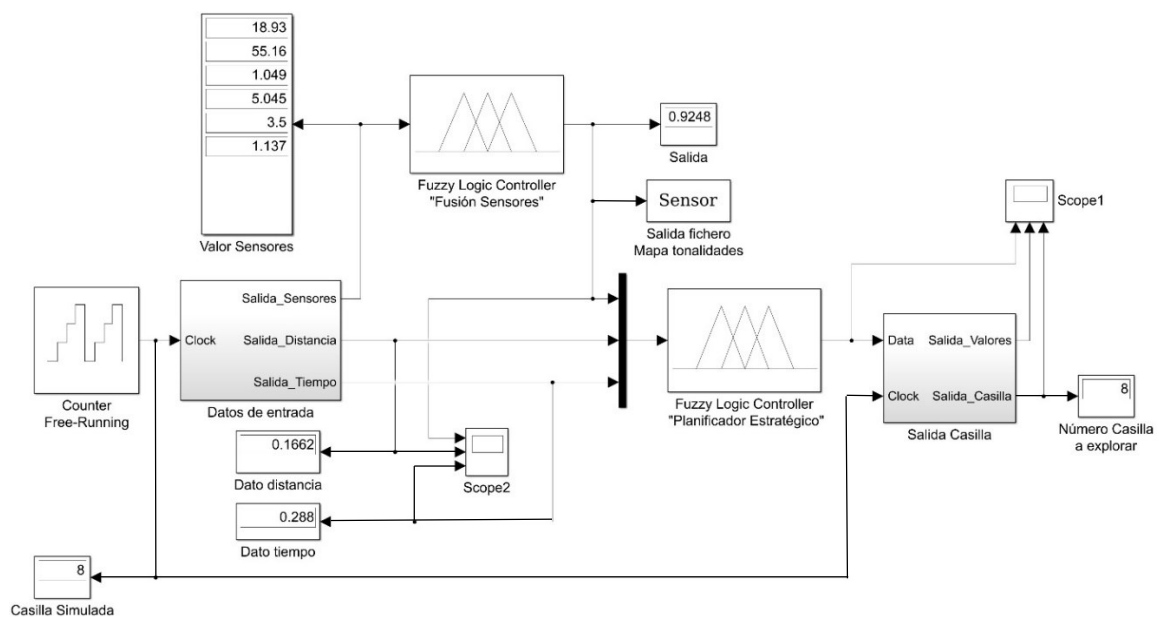


Figura 4.16: Modelo de “Gestor Estratégico” de toma de decisiones realizado en Simulink/Matlab. Este modelo creado permite mediante su simulación verificar el correcto funcionamiento del mismo.

El bloque “Datos de entrada” realiza la lectura de los valores almacenados en las variables introducidas en Matlab procedentes del fichero de datos Excel, el cual contiene tres tablas, la primera contiene los valores medidos de los sensores, la segunda la distancia entre las casillas

y el ASV-Boya y la tercera tabla el tiempo transcurrido desde que se obtuvieron los datos de los sensores o la exploración de esa casilla.

El bloque “Salida Casilla” recibe la información del módulo “Planificador Estratégico”, y obtiene en su salida el número de casilla que se visualiza en el bloque Display “Número Casilla a explorar”.

Se ha utilizado el bloque Counter Free-Running de 8 bits para secuenciar la entrada de datos de los valores de los sensores, distancia y del tiempo. Todos los datos entran al bloque “Datos de entrada”, desde la casilla 1 hasta la casilla 25 visualizadas mediante el Display “Casilla Sensor”, menos la casilla donde se encuentra el ASV-Boya.

Los bloques Fuzzy Logic Controller contienen los sistemas de toma de decisiones creados en el FIS de Matlab, que comprueban los valores de cada casilla en cada segundo o fracción de tiempo.

Los datos de salida del módulo “Fusión Sensores” se visualizan en el Display “Salida” y son introducidos en el bloque “Salida fichero”, que los guarda en la variable “Sensor” en Matlab para su posterior grabación en un fichero Excel, donde se crea el mapa de tonalidades de colores y para su posterior análisis.

En el bloque “Valor Sensores” se visualizan los valores numéricos de los datos de entrada de los 6 parámetros físico-químicos introducidos, casilla a casilla y en el bloque “Scope2” se obtienen las gráficas de todos los datos de entrada al sistema.

Para que funcione correctamente este modelo de Simulink se ha creado en el FIS editor de Matlab los Fuzzy Logic Controller el sistema “Fusión Sensores” y el sistema “Planificador Estratégico”, que pasamos a describir en el apartado 3.1.1 y siguientes de este capítulo.

En el apartado 3.3 se pueden ver las gráficas y los valores obtenidos mediante este modelo y una descripción detallada de la simulación.

Se inicia el experimento colocando el ASV-Boya en la casilla 1, se realiza una secuencia de lectura de la base de datos del fichero donde se encuentran almacenados los datos de las coordenadas GPS, UTM, fecha y los valores de los sensores de cada una de las 25 casillas, el algoritmo realiza el siguiente proceso:

- 1- Calcula la distancia desde la casilla 1 hasta la casilla i , con la **Ecuación 2**.
- 2- Calcula el tiempo transcurrido desde que se tomaron los valores de la casilla i .

- 3- Introduce los valores de los parámetros físico-químicos de la casilla i al sistema difuso “Fusión Sensores” para su evaluación.
- 4- El valor obtenido en la salida del sistema difuso “Fusión Sensores” de la casilla i se utiliza para establecer el color en el mapa de tonalidades.
- 5- Se introducen al sistema difuso “Planificador Estratégico” los valores obtenidos de la distancia, del tiempo y el valor de salida del sistema difuso “Fusión Sensores” de la casilla i , cuando ha terminado con la lectura de la última casilla se obtiene el valor de la casilla más prioritaria a explorar, en este caso la casilla 8.

$$Distancia = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (2)$$

Donde:

$Distancia$ = Distancia Euclidea en km desde la casilla i hasta la casilla donde está el ASV-Boya.

x_0 = Valor de la latitud de las coordenadas UTM de la casilla donde se encuentra el ASV-Boya.

y_0 = Valor de la longitud de las coordenadas UTM de la casilla donde se encuentra el Vehículo.

x_i = Valor de la latitud de las coordenadas UTM de la casilla x_i , donde i vale desde la casilla 2 hasta la casilla 25.

y_i = Valor de la longitud de las coordenadas UTM de la casilla y_i , donde i vale desde la casilla 2 hasta la casilla 25.

La decisión sobre qué casilla explorar se toma teniendo en cuenta tres parámetros fundamentales: su grado de interés (relacionado con el estado de las variables físico-químicas), la distancia del ASV-Boya a otras casillas y el tiempo transcurrido desde la última exploración.

La **Ecuación (3)** da las reglas utilizadas para la selección:

$$CasillaInterés = \frac{(InterésObservación + TiempoInterés)}{Distancia} \quad (3)$$

Donde:

$CasillaInterés$ = Interés de cada una de las casillas de ser exploradas.

$$\text{InterésObservación} = \begin{cases} 24 \text{ (dos años)} & \text{el interés de la casilla es muy importante} \\ 12 \text{ (un año)} & \text{el interés de la casilla es importante} \\ 0 & \text{no es importante} \end{cases}$$

TiempoInterés = Tiempo transcurrido en meses desde la última exploración.

Distancia = Distancia en km del ASV-Boya a otras casillas.

4.9.1.1 Implementación del Sistema Sensores en Lógica Difusa.

En el interior del Nivel Estratégico, el sistema difuso “Fusión Sensores” proporciona un mapa con las tonalidades de colores, que representan los niveles de contaminación o estado de cada una de las casillas en las que está dividida el área que se va a explorar.

A continuación, se describe el método utilizado para implementar este sistema mediante el Fuzzy Logic Designer del entorno de programación MATLAB.

Para obtener estas tonalidades de colores se introducen al sistema “Fusión Sensores” los valores de los sensores de los parámetros físico-químicos del ASV-Boya, tal como se puede ver en la **Figura 4.17**, para obtener el estado de cada casilla.

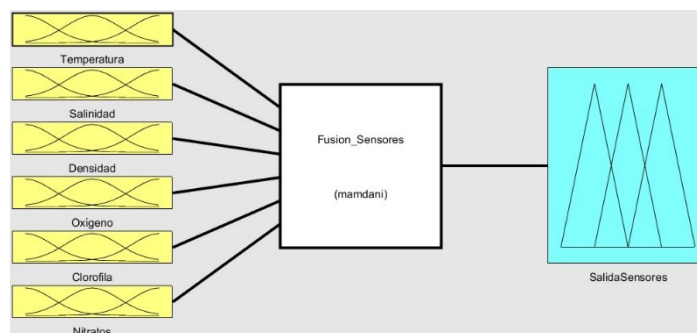


Figura 4.17: Sistema difuso implementado en el Fuzzy Logic Designer: “Fusión Sensores” de Matlab, donde se aprecian las 6 entradas de las señales de los sensores y una salida.

Para representar los valores de membresía en este trabajo se ha utilizado la forma triangular y la forma singletón como se pueden ver en la **Figura 4.18**.

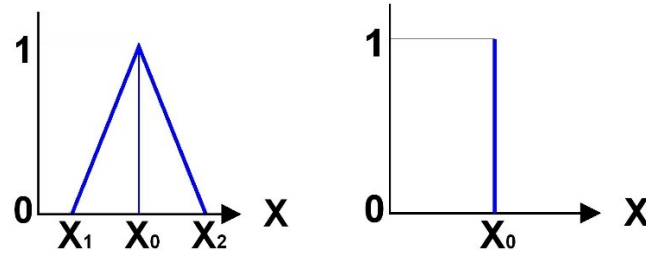


Figura 4.18: Forma triangular y singletón.

Las condiciones de la forma triangular están definidas en la **Ecuación (4)** y la forma singletón en la **Ecuación (5)**.

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_1 \\ \frac{x - x_1}{x_0 - x_1}, & x_1 \leq x \leq x_0 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_0}, & x_0 \leq x \leq x_2 \\ 0, & x \geq x_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$A(x) = \begin{cases} 1, & x = X_0 \\ 0, & x \neq X_0 \end{cases} \quad (5)$$

Las variables lingüísticas utilizadas en el Sistema de Sensores son:

Para la Temperatura:

x = Temperatura.

$X = [10, 50]$

$T(\text{Temperatura}) = \{\text{Buena, Regular, Mala}\}$

$M(\text{Buena}) = \text{trapmf}(\text{Temperatura}); \{-4.4, 8.4, 15, 25\}$

$M(\text{Regular}) = \text{trimf}(\text{Temperatura}); \{20, 30, 40\}$

$M(\text{Mala}) = \text{trapmf}(\text{Temperatura}); \{35, 45, 52, 68\}$

Para la Salinidad:

y = Salinidad.

$Y = [30, 60]$

$T(\text{Salinidad}) = \{\text{Mala, Regular, Buena}\}$

$M(\text{Mala}) = \text{trapmf}(\text{Salinidad}); \{19.2, 28.8, 34.99, 40.99\}$

$M(\text{Regular}) = \text{trimf}(\text{Salinidad}); \{37.5, 45, 52.5\}$

$M(\text{Buena}) = \text{trapmf}(\text{Salinidad}); \{49.01, 55.01, 61.5, 73.5\}$

Para la Densidad:

$z = \text{Densidad}.$

$Z = [1.02, 1.06]$

$T(\text{Densidad}) = \{\text{Mala}, \text{Regular}, \text{Buena}\}$

$M(\text{Mala}) = \text{trapmf}(\text{Densidad}); \{1.005, 1.019, 1.024, 1.035\}$

$M(\text{Regular}) = \text{trimf}(\text{Densidad}); \{1.029, 1.04, 1.051\}$

$M(\text{Buena}) = \text{trapmf}(\text{Densidad}); \{1.048, 1.056, 1.064, 1.08\}$

Para el Oxígeno:

$u = \text{Oxígeno}.$

$U = [2, 6]$

$T(\text{Oxígeno}) = \{\text{Mala}, \text{Regular}, \text{Buena}\}$

$M(\text{Mala}) = \text{trapmf}(\text{Oxígeno}); \{0.56, 1.84, 2.507, 3.507\}$

$M(\text{Regular}) = \text{trimf}(\text{Oxígeno}); \{3, 4, 5\}$

$M(\text{Buena}) = \text{trapmf}(\text{Oxígeno}); \{4.507, 5.507, 6.2, 7.8\}$

Para el Clorofila:

$v = \text{Clorofila}.$

$V = [0, 4]$

$T(\text{Clorofila}) = \{\text{Buena}, \text{Regular}, \text{Mala}\}$

$M(\text{Buena}) = \text{trapmf}(\text{Clorofila}); \{-1.44, -0.16, 0.5, 1.501\}$

$M(\text{Regular}) = \text{trimf}(\text{Clorofila}); \{1, 2, 3\}$

$M(\text{Mala}) = \text{trapmf}(\text{Clorofila}); \{2.501, 3.501, 4.2, 5.8\}$

Para los Nitratos:

$w = \text{Nitratos}.$

$W = [1, 2]$

$T(\text{Nitratos}) = \{\text{Buena}, \text{Regular}, \text{Mala}\}$

$M(\text{Buena}) = \text{trapmf}(\text{Nitratos}); \{0.64, 0.96, 1.125, 1.375\}$

$M(\text{Regular}) = \text{trimf}(\text{Nitratos}); \{1.25, 1.5, 1.75\}$

$M(\text{Mala}) = \text{trapmf}(\text{Nitratos}); \{1.625, 1.875, 2.05, 2.45\}$

Para la Salida:

$x = \text{SalidaSensores}.$

$X = [0, 1]$

$T(\text{SalidaSensores}) = \{\text{MuyBueno}, \text{Bueno}, \text{Normal}, \text{Malo}, \text{MuyMalo}\}$

$M(\text{MuyBueno}) = \text{trapmf}(\text{Salida}); \{-0.36, -0.04, 0.10, 0.20\}$

$M(\text{Bueno}) = \text{trimf}(\text{Salida}); \{0.15, 0.30, 0.45\}$

$M(\text{Normal}) = \text{trimf}(\text{Salida}); \{0.40, 0.50, 0.60\}$

$M(\text{Malo}) = \text{trimf}(\text{Salida}); \{0.55, 0.70, 0.85\}$

$M(\text{MuyMalo}) = \text{trapmf}(\text{Salida}); \{0.80, 0.90, 1.01, 1.48\}$

La **Figura 4.19** muestra las funciones de membresía y pertenencia difusas para los valores de los sensores de entrada y en la **Figura 4.20** la función de membresía para el valor de salida, se han implementado en el Membership Function Editor: “Fusión Sensores”.

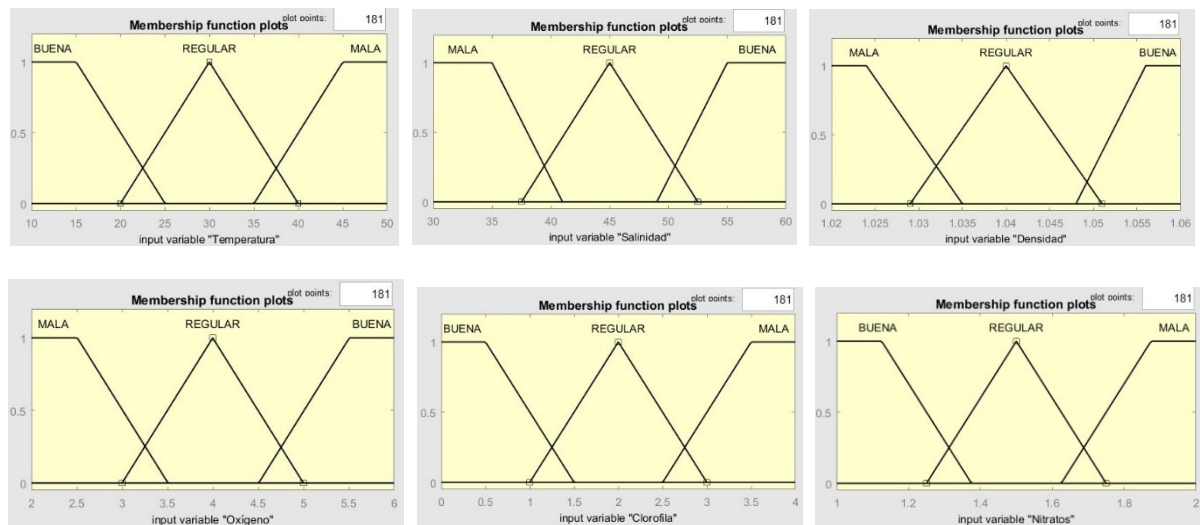


Figura 4.19: Funciones de membresía para cada uno de los seis sensores, Temperatura, Salinidad, Densidad, Oxígeno, Clorofila y Nitratos.

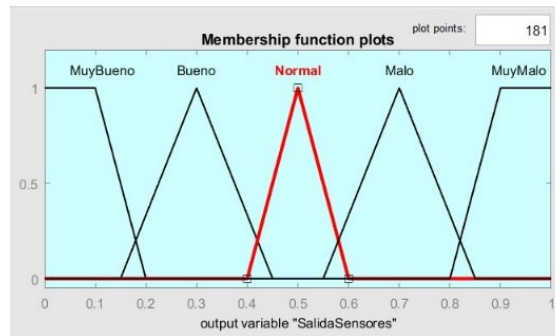


Figura 4.20: Función de pertenencia de salida para clasificar las casillas según los valores de los sensores.

Después de la defusificación, la salida del sistema difuso “SalidaSensores” valuó el estado de la red, por lo tanto, para un experimento específico, cada una de las casillas del mapa se colorearon como se muestra en la **Figura 4.21**:

- Muy bueno (verde)
- Bueno (verde claro)
- Normal (amarillo)
- Malo (naranja)
- Muy malo (rojo)

Una zona crítica en estado Muy Malo se puede ver en la casilla 8, es debido a un exceso de Clorofila al que se le ha modificado de forma manual su valor en la entrada para la simulación. Varias tendencias, anormales, pueden observarse, mientras que el resto se clasifica como Regular, Bueno o Muy Bueno.

Para que el modelo difuso creado pueda proporcionar los valores adecuados en la salida, es necesario introducir unas reglas que permitan establecer unos criterios de evaluación adecuados, en total, se han implementado 65 reglas de conocimiento en el sistema difuso, que de forma resumida siguen el comportamiento que se muestra a continuación:

- Si el valor de cualquiera de las entradas es MALO, entonces la salida es MuyMalo.
- Si no hay valores MALO, pero hay 5 o más valores REGULAR, entonces la salida es Malo.
- Si no hay valores MALO, hay 3 ó 4 valores REGULAR, pero hay algún valor BUENO, entonces la salida es Normal.
- Si no hay valores MALO, pero hay 4 ó 5 valores BUENO, entonces la salida es Bueno.
- Si todos los valores de entrada son BUENO, la salida es MuyBueno.

Las funciones de membresía de entrada consiguen que los valores procedentes del mundo real se conviertan en valores difusos, mediante la Fuzzificación. En el sistema difuso para cada uno de los valores de los sensores introducidos se realiza la membresía entre ellos y de acuerdo a estas reglas se van obteniendo unos valores en la salida, valores que después de realizar la membresía de salida se convierten en valores adecuados para el mundo real y establecen las tonalidades del mapa obtenido en la **Figura 4.21**, el método de membresía utilizado es el de Mamdani [54].

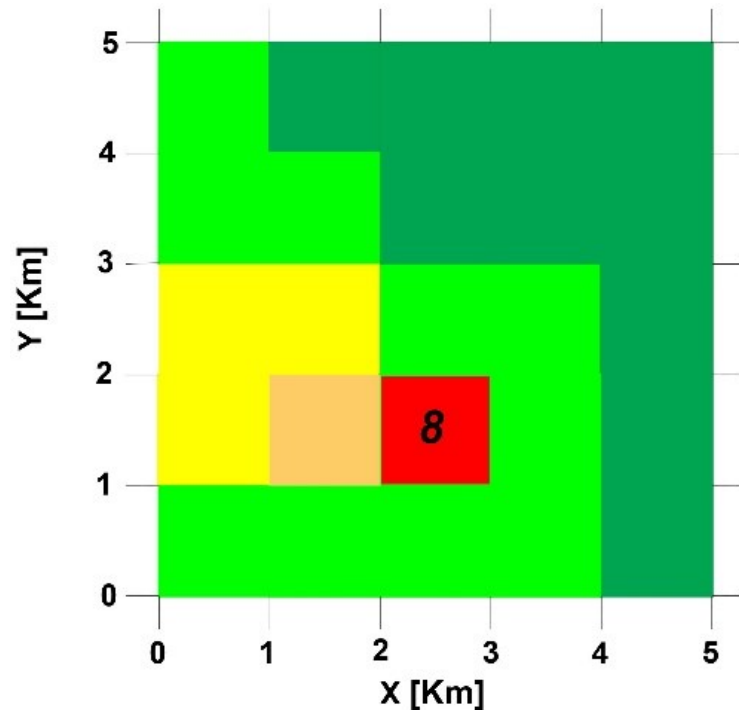


Figura 4.21: Colores del estado de cada casilla del área a explorar.

En la **Tabla 4.2** se pueden ver las 65 reglas de conocimiento que se han introducido en el sistema creado en el Rule Editor “Fusión Sensores”, del Toolbox Fuzzy Logic de Matlab, para que realice la toma de decisiones según las condiciones impuestas por estas reglas, tratan de simular el comportamiento de un experto proporcionando las condiciones en que se debe basar la toma de decisiones.

Tabla 4.2. Listado de las 65 Reglas de conocimiento utilizadas en el módulo “Fusión Sensores”, se pueden ver las condiciones para los 6 parámetros y en la entrada “Clorofila” está en nivel “Malo”, por lo que la salida toma el nivel “MuyMalo”, condición proporcionada por la regla número 1.

Regla	Temperatura	Salinidad	Densidad	Oxígeno	Clorofila	Nitratos	Salida
1	MALA	MALA	MALA	MALA	MALA	MALA	MUYMALA
2	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	MALA
3	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	MALA
4	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	MALA
5	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	MALA
6	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	MALA
7	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	MALA
8	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	MALA
9	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	MALA
10	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	MALA
11	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	MALA
12	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	MALA
13	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	MALA
14	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	MALA
15	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	MALA
16	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	MALA
17	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	MALA
18	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	MALA
19	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	MALA
20	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	MALA
21	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	MALA
22	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	MALA
23	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	REGULAR	MALA
24	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	NORMAL
25	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	NORMAL
26	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	NORMAL
27	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	NORMAL
28	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	NORMAL
29	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	NORMAL
30	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	NORMAL
31	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	NORMAL
32	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	NORMAL
33	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	NORMAL
34	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	REGULAR	NORMAL
35	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	NORMAL
36	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	NORMAL
37	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	NORMAL
38	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	NORMAL
39	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	NORMAL
40	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	NORMAL
41	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	NORMAL
42	REGULAR	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	NORMAL
43	REGULAR	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	NORMAL
44	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA
45	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA
46	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA
47	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA
48	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA
49	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA
50	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA
51	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA
52	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA
53	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA
54	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA
55	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA
56	REGULAR	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA
57	REGULAR	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA
58	REGULAR	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA
59	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	MUYBUENA
60	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	MUYBUENA
61	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	MUYBUENA
62	BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	MUYBUENA
63	BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	MUYBUENA
64	REGULAR	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	MUYBUENA
65	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	MUYBUENA

4.9.1.2 Gráficas obtenidas en la simulación para el módulo “Fusión Sensores”.

Una vez realizada la simulación, los valores que se obtiene en la salida del sistema “Fusión Sensores” se representan en las gráficas de la **Figura 4.22**, comparando cada valor de entrada de cada sensor con la salida del sistema, de esta manera se puede ver la disposición de los valores que tiende la SalidaSensores. Se aprecia que la Temperatura mantiene un valor constante en la salida hasta los 32 °C y los 33 °C y es a partir de los 35 °C cuando ejerce un importante cambio en la salida.

En la Salinidad sucede que para valores por debajo de 37 g/L de concentración en el agua medida, la salida es muy alta y es para valores por encima de 37 g/L de concentración en la salida se obtienen valores más bajos.

Los valores medidos de la Densidad en cuanto se rebajan los 1,03 σ_t/L , ya se hacen peligrosos y por lo tanto la salida obtiene valores elevados.

El Oxígeno sucede que para valores por debajo de 3,4 mg/L de concentración en el agua medida, la salida es muy alta y es para valores por encima del 3,5 mg/L de concentración en la salida se obtienen valores más bajos.

Las siguientes gráficas muestran que para valores de concentración de Clorofila superiores 2,7 $\mu g/L$ suelen ser peligrosos.

Lo mismo sucede para los Nitratos para concentraciones superiores a 1,65 mg/L suelen ser peligrosos.

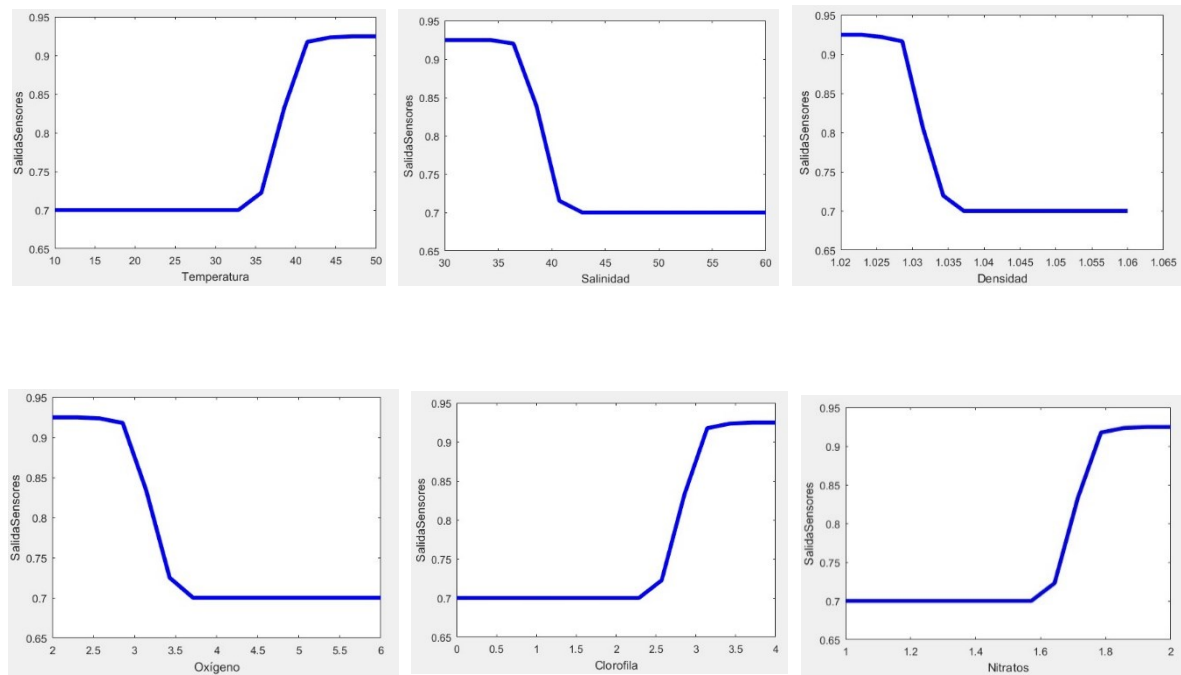


Figura 4.22: Gráficas donde se aprecia la evolución de los valores de la salida del sistema “Fusión Sensores” normalizadas entre 0 y 1, respecto de cada uno de los valores de las señales de entrada de los 6 sensores.

Las superficies en 3D obtenidas en la simulación en “Surface Viewer: Sensor”, las podemos ver en las gráficas de la **Figura 4.23**, que representan valores de la salida respecto a la combinación de cada dos señales de dos sensores, de los valores de los 6 sensores, la última gráfica es una muestra de la simulación obtenida mediante el “Plot; Pseudo-Color”, que expresa las tendencias entre “Temperatura-Oxígeno”.

Estas gráficas nos proporcionan una información muy importante respecto la tendencia que tomarán los valores de la salida respecto a los valores de las entradas, de manera que, analizando y estudiando estas gráficas podemos valorar el comportamiento del sistema difuso diseñado en Matlab.

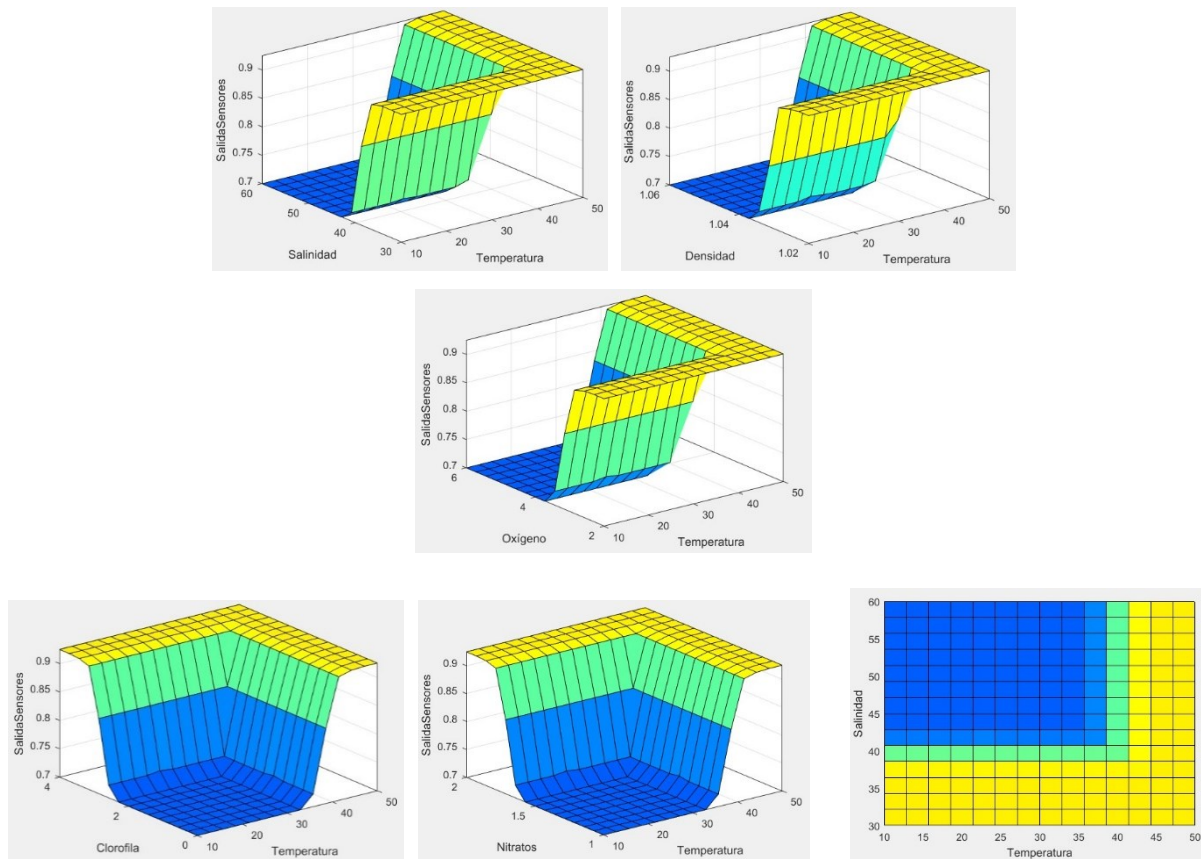


Figura 4.23: Gráficas de mallas de superficie en 3D de la evolución de la salida respecto a las entradas de los valores de los sensores.

El experimento realizado consiste en disponer de un fichero Excel “datos_SimulacionesV2.xls”, con las tablas donde se encuentran almacenados cada uno de los valores de los 6 sensores “Hoja 1”, de cada una de las 25 casillas, se pueden ver en la **Tabla 4.3**, así como las coordenadas de las 25 casillas “Hoja 2” y la fecha en que se realizaron las mediciones de los sensores “Hoja 3”.

También se ha creado en Matlab ficheros.m, que se encarga de leer los valores de los sensores, de la fecha y de la distancia desde donde se encuentra el ASV-Boya hasta las demás casillas mediante la **Ecuación 2**, descrita anteriormente, se ejecuta el fichero “Control_Estratégico1.m”.

Tabla 4.3. Valores del Fichero que lee los datos de una tabla en Excel y los guarda en una matriz en Matlab, $si=x1(i,1:end)$; donde “si” son los valores leídos de los sensores de cada casilla, “x1” es la variable de la matriz, “(i,1)” i representa la fila leída y el 1 la columna.

Número de casilla	Variable x	Lectura fila, columna
s1	x1	(1,1:end);
s2	x1	(2,1:end);
s3	x1	(3,1:end);
s4	x1	(4,1:end);
s5	x1	(5,1:end);
s6	x1	(6,1:end);
s7	x1	(7,1:end);
s8	x1	(8,1:end);
s9	x1	(9,1:end);
s10	x1	(10,1:end);
s11	x1	(11,1:end);
s12	x1	(12,1:end);
s13	x1	(13,1:end);
s14	x1	(14,1:end);
s15	x1	(15,1:end);
s16	x1	(16,1:end);
s17	x1	(17,1:end);
s18	x1	(18,1:end);
s19	x1	(19,1:end);
s20	x1	(20,1:end);
s21	x1	(21,1:end);
s22	x1	(22,1:end);
s23	x1	(23,1:end);
s24	x1	(24,1:end);
s25	x1	(25,1:end);

Una vez realizada la simulación mediante Simulink se guardan los valores de salida del sistema difuso “Fusión_Sensores” en una matriz de variables con todos los valores de salida en Matlab, posteriormente se ejecuta el fichero “Control_Estratégico2.m” y se pasan los datos al fichero Excel “datos_SimulacionesV2.xls”, **Figura 4.24**, para ser guardados en la hoja número 4 en forma de tabla numérica y crear el mapa de tonalidades.

```
%Crea un libro en Excel con los valores de las salidas:
salida(:,1)=Sensor.time;
salida(:,2)=Sensor.signals(1).values(:,1);
xlswrite('datos_Sensores_25_V2.xls',salida,4);
```

Figura 4.24: Fichero ejecutable creado en Matlab para enviar los valores de salida del Modelo creado en Simulink de cada una de las 25 casillas al fichero Excel (datos_SimulacionesV2.xls) y crear una tabla.

4.9.1.3 Implementación del módulo “Planificador Estratégico”.

El modelo se ha implementado en el Fuzzy Logic Controller, en el Toolbox de Matlab, en el FIS Editor, tal como se aprecia en la **Figura 4.25**., donde se han realizado las funciones de membresía, hay tres entradas para el sistema de lógica difusa y una salida.

Las entradas (Sensores, Distancia y Tiempo) son básicamente los valores recibidos de la base de datos correspondientes al valor medio de los parámetros de contaminación físico-químicos del agua, a la salida del módulo “Fusión Sensores”, a la distancia entre las casillas a explorar y al tiempo que se tomaron los valores.

Desde el FIS Editor escogemos el método de defuzzificación y dando doble clic sobre “Mamdani”, después se introducen las reglas de conocimiento, y en “View Rules” vemos las salidas defuzzificadas para las diferentes opciones de las variables de entrada.

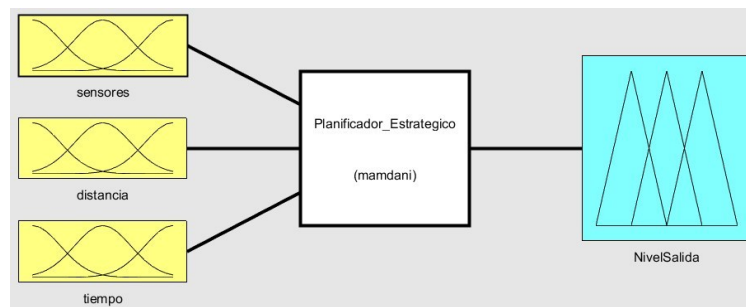


Figura 4.25: Fuzzy Inference System (FIS) con las entradas y la salida.

Funciones de membresía de entrada

Como los valores de salida del módulo “Fusión Sensores”, de la distancia y del tiempo expresan datos relativos al mundo real, es necesaria la traducción a lógica difusa, para ello, se realizan las funciones de membresía, esto se realiza en la interfaz de fuzzificación.

Las funciones de membresía están representadas en la **Figura 4.26**, en (a) está la membresía de entrada para los sensores, en (b) está la membresía para la distancia y en (c) la membresía para el tiempo, el eje Y es el grado de pertenencia, que describe cuantitativamente la función de membresía, siendo el eje X el valor de la señal real recibida.

Los nombres de Bajo, Medio y Alto, son la significancia lingüística y describe cualitativamente la función de membresía. Las variables lingüísticas utilizadas en la entrada en el “Planificador Estratégico” son:

Para los Sensores:

$x = \text{Sensores.}$

$$X = [0, 1]$$

$$T(\text{Sensores}) = \{\text{Bajo, Medio, Alto}\}$$

$$M(\text{Bajo}) = \text{trapmf}(\text{Sensores}; -0.8275, -0.7225, 0.15, 0.35\}$$

$$M(\text{Medio}) = \text{trimf}(\text{Sensores}; 0.25, 0.5, 0.75\}$$

$$M(\text{Alto}) = \text{trapmf}(\text{Sensores}; 0.65, 0.85, 1.18, 1.32\}$$

Para la Distancia:

$x = \text{Distancia.}$

$$X = [0, 1]$$

$$T(\text{Distancia}) = \{\text{Cerca, Media, Lejos}\}$$

$$M(\text{Cerca}) = \text{trapmf}(\text{Distancia}; -0.8275, -0.7225, 0.15, 0.35\}$$

$$M(\text{Media}) = \text{trimf}(\text{Distancia}; 0.25, 0.5, 0.75\}$$

$$M(\text{Lejos}) = \text{trapmf}(\text{Distancia}; 0.65, 0.85, 1.18, 1.32\}$$

Para el Tiempo:

$x = \text{Tiempo.}$

$$X = [0, 1]$$

$$T(\text{Tiempo}) = \{\text{Poco, Medio, Mucho}\}$$

$$M(\text{Poco}) = \text{trapmf}(\text{Tiempo}; -0.8275, -0.7225, 0.15, 0.35\}$$

$$M(\text{Medio}) = \text{trimf}(\text{Tiempo}; 0.25, 0.5, 0.75\}$$

$$M(\text{Mucho}) = \text{trapmf}(\text{Tiempo}; 0.65, 0.85, 1.18, 1.32\}$$

La forma de la función de membresía se elige teniendo en cuenta la experiencia del experto, del piloto del ASV-Boya y del problema a resolver, puede tener diferentes formas: triangular, gaussiana, trapezoidal, sigmoidal, etc. En este caso escogemos una forma triangular **Figura 4.18.**

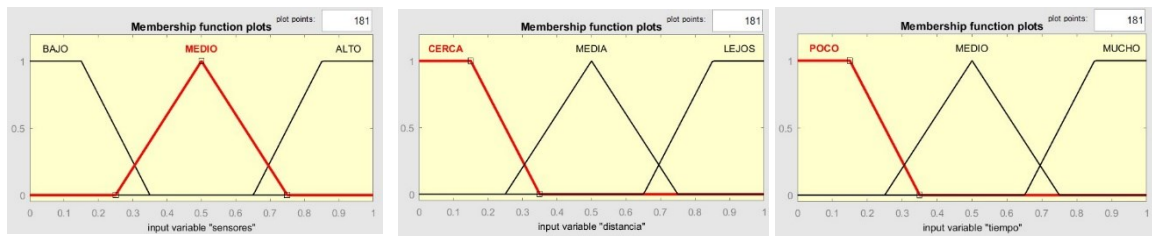


Figura 4.26: Membresías de entrada, en a) Membresía de la señal de los sensores, b) Membresía de la distancia y en c) Membresía del tiempo.

Funciones de membresía de salida

El modelo de Fuzzy Logic Controller de “Planificador Estratégico” realizado en la **Figura 4.27**, para obtener el resultado de salida utiliza la defuzzificación que transforma el conjunto difuso de salida en un valor nítido para ser utilizado en el sistema real de control por el ASV-Boya.

La función de membresía de salida está representada en la **Figura 4.28**, el eje Y es el grado de pertenencia, que describe cuantitativamente la función de membresía, siendo el eje X el valor de la señal real obtenida.

Los nombres de Bajo, Medio y Alto, son la significancia lingüística y describe cualitativamente la función de membresía. La variable lingüística utilizada en la salida en el “Planificador Estratégico” es:

Para el Nivel de Salida:

$x = \text{NivelSalida}$.

$X = [0, 1]$

$T(\text{NivelSalida}) = \{\text{Bajo}, \text{Medio}, \text{Alto}\}$

$M(\text{Bajo}) = \text{trapmf}(\text{NivelSalida}; -0.8275, -0.7225, 0.15, 0.35)$

$M(\text{Medio}) = \text{trimf}(\text{NivelSalida}; 0.25, 0.5, 0.75)$

$M(\text{Alto}) = \text{trapmf}(\text{NivelSalida}; 0.65, 0.85, 1.18, 1.32)$

La forma de la función de membresía se elige teniendo en cuenta la experiencia del experto, del piloto de embarcaciones y del problema a resolver, puede tener diferentes formas: triangular, gaussiana, trapezoidal, sigmoidal, etc. En este caso escogemos una forma triangular **Figura 4.18**.

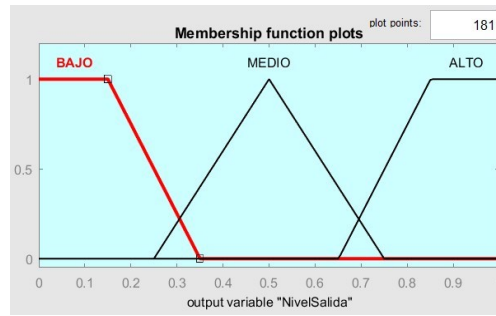


Figura 4.27: Membresía de salida realizado en Matlab.

En las gráficas de la **Figura 4.28:** y la **Figura 4.29:**, podemos ver las superficies que representan la salida del controlador fuzzy, en función de las variables de entrada.

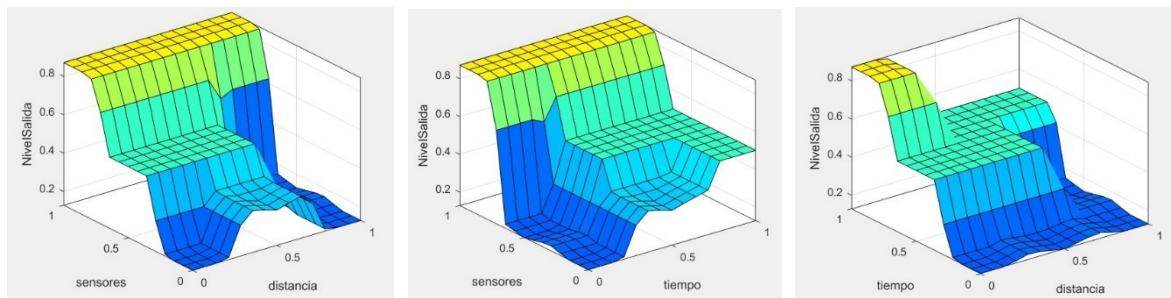


Figura 4.28: Gráficas de superficie en 3D de la evolución de las señales de salida respecto a las señales de entrada, del “Planificador Estratégico”.

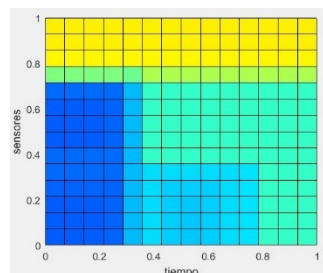


Figura 4.29: Gráfica de superficie de la señal de los sensores respecto al tiempo, vista de plano.

Reglas difusas.

El controlador difuso debe emular el comportamiento de un piloto o experto, por eso, basándose en las funciones de pertenencia del conjunto difuso, de las entradas y salida, es necesario establecer unas reglas. Existen 17 reglas para establecer la selección de la casilla a explorar.

De las simulaciones se obtiene la respuesta del sistema difuso principal en lazo abierto, de esta manera se obtiene la estrategia de control del ASV-Boya.

La propuesta de base de reglas la podemos ver en la **Tabla 4. 4.**

Tabla 4. 4. 17 Reglas de conocimiento utilizadas en el módulo “Planificador Estratégico” en Matlab.

Regla	Sensores	Distancia	Tiempo	NivelSalida
1	BAJO	CERCA	POCO	BAJO
2	BAJO	CERCA	MEDIO	BAJO
3	BAJO	CERCA	MUCHO	MEDIO
4	BAJO	MEDIA	POCO	BAJO
5	BAJO	MEDIA	MEDIO	BAJO
6	BAJO	MEDIA	MUCHO	MEDIO
7	BAJO	LEJOS	-	BAJO
8	MEDIO	CERCA	POCO	BAJO
9	MEDIO	CERCA	MEDIO	MEDIO
10	MEDIO	CERCA	MUCHO	ALTO
11	MEDIO	MEDIA	POCO	BAJO
12	MEDIO	MEDIA	MEDIO	MEDIO
13	MEDIO	MEDIA	MUCHO	MEDIO
14	MEDIO	LEJOS	POCO	BAJO
15	MEDIO	LEJOS	MEDIO	BAJO
16	MEDIO	LEJOS	MUCHO	MEDIO
17	ALTO	-	-	ALTO

4.9.2 Nivel Táctico.

Después de describir la implementación de varios de los subsistemas y módulos de que consta el Nivel Estratégico, para continuar en este apartado se describe el modelo de “Gestor de Ejecución” y “Planificador Táctico” implementados en Simulink/Matlab, se pueden ver en la **Figura 4.30.**

Para implementar este modelo ha sido necesario realizar varios módulos utilizando bloques de Simulink, se ha utilizado un bloque Fuzzy Logic Controller del Fuzzy Logic Toolbox, donde se ha introducido el nombre del sistema creado en Fuzzy Logic Designer del entorno de programación MATLAB el módulo “Planificador Táctico”.

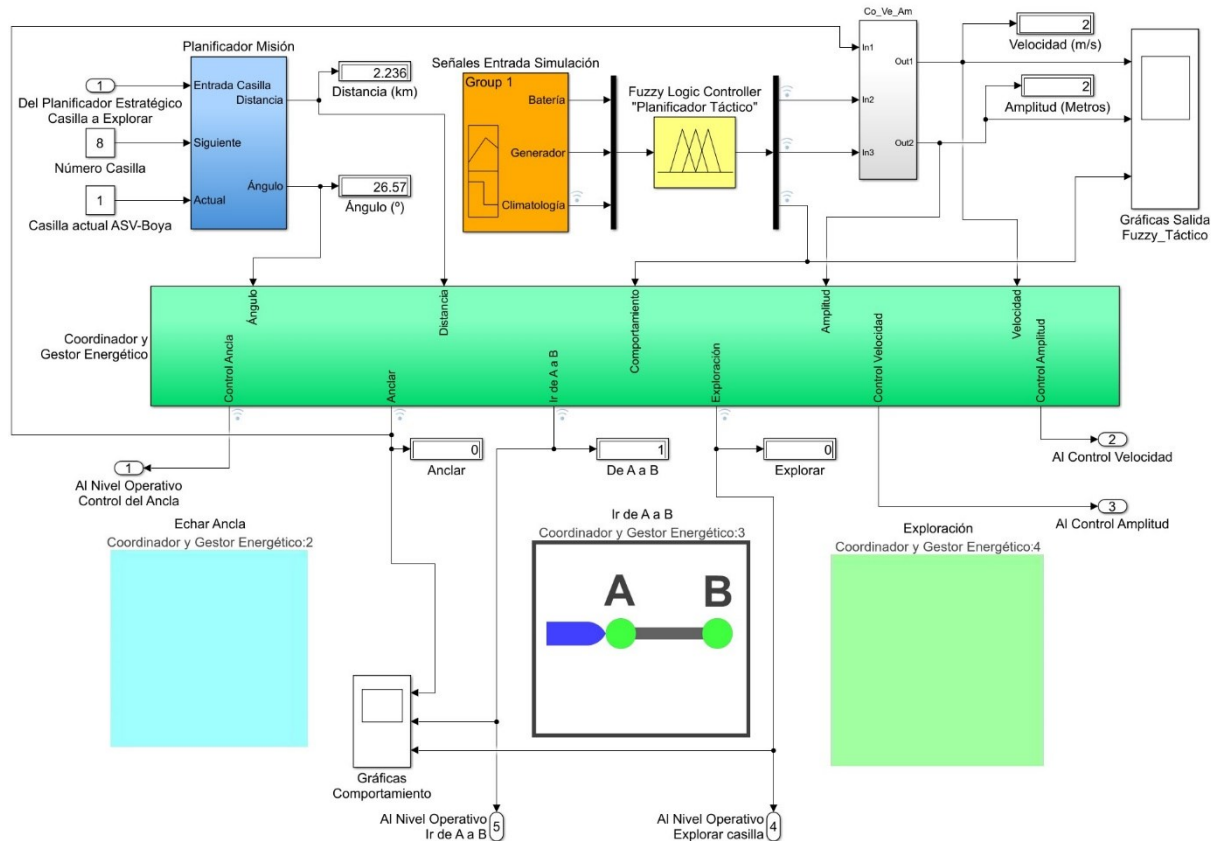


Figura 4.30: Modelo del “Gestor de Ejecución” realizado en Simulink/Matlab.

Se ha creado el modelo “Coordinador y Gestor Energético” utilizando bloques de Simulink, donde entran los datos de la salida del módulo “Planificador Misión”, además de las señales del módulo “Planificador Táctico”, donde se realiza la decodificación y se obtienen los resultados de las tres formas de comportamiento con los algoritmos pregrabados como “Anclar”, “Ir de A a B” y “Exploración”.

A la salida del bloque “Planificador Táctico” se visualiza la velocidad en el Display “Velocidad (m/s)”, la amplitud en el Display “Amplitud (metros)” y las gráficas en el Scope “Salida Fuzzy_Tactico”.

El submodelo “Coordinador y Gestor Energético” dispone de una entrada y tres salidas, una para seleccionar el comportamiento “Echar Ancla”, otra para “Ir de A a B” y otra para “Exploración”.

En el apartado de resultados y conclusiones se puede ver el comportamiento de este modelo cuando se simula en Simulink.

4.9.2.1 Implementación del Gestor Táctico.

Para que funcione el modelo creado en Simulink de la **Figura 4.31** es necesario crear e implementar el sistema del Gestor Táctico en el Fuzzy Logic Controller, en el Toolbox de Matlab (49), en el FIS Editor, donde se han realizado las funciones de membresía, creando el modelo “Planificador Táctico” que contiene tres entradas para el sistema de lógica difusa y tres salidas.

Las entradas (Batería, Generador y Climatología) son básicamente los valores recibidos de los sensores para medir la carga de la batería, sensores para medir la radiación solar y sensores para saber el tiempo o la climatología como anemómetro y termómetro.

En este modelo se han propuesto tres salidas una para indicar la velocidad de exploración, la amplitud de separación entre recorridos explorados y el comportamiento a realizar.

En el Editor escogemos el método de defuzzificación y dando doble clic sobre “Mamdani”, después se introducen las reglas de conocimiento, y en “View Rules” vemos las salidas defuzzificadas para las diferentes opciones de las variables de entrada.

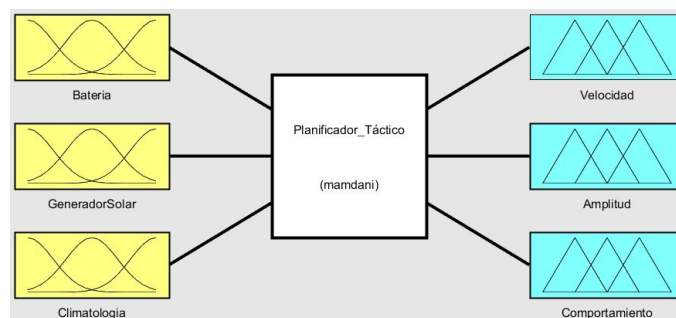


Figura 4.31: Fis Editor, “Gestor Táctico” conteniendo las entradas, salidas y el “Planificador Táctico”

Funciones de membresía de entrada

Como los valores de salida de los sensores expresan datos relativos al mundo real, es necesaria la traducción a lógica difusa, para ello, se realizan las funciones de membresía, esto se realiza en la interfaz de fuzzificación.

Las funciones de membresía están representadas en la **Figura 4.32**, en (a) está la membresía de entrada para la batería, en (b) está la membresía para la generación y en (c) la membresía para la climatología, el eje Y es el grado de pertenencia, que describe cuantitativamente la función de membresía, siendo el eje X el valor de la señal real recibida.

Los nombres de Baja, Media y Alta, son la significancia lingüística y describe cualitativamente la función de membresía. Las variables lingüísticas utilizadas en la entrada en el “Planificador Táctico” son:

Para las Baterías:

$x = \text{Batería.}$

$X = [0, 100]$

$T(\text{Batería}) = \{\text{Baja, Media, Alta}\}$

$M(\text{Baja}) = \text{trapmf}(\text{Batería}); \{-50, -40, 20, 35\}$

$M(\text{Media}) = \text{trimf}(\text{Batería}); \{30, 50, 70\}$

$M(\text{Alta}) = \text{trapmf}(\text{Batería}); \{65, 80, 150, 160\}$

Para el Generador:

$y = \text{Generador.}$

$Y = [0, 100]$

$T(\text{Generador}) = \{\text{Baja, Media, Alta}\}$

$M(\text{Baja}) = \text{trapmf}(\text{Generador}); \{-50, -40, 20, 35\}$

$M(\text{Media}) = \text{trimf}(\text{Generador}); \{30, 50, 70\}$

$M(\text{Alta}) = \text{trapmf}(\text{Generador}); \{65, 80, 150, 160\}$

Para la Climatología:

$z = \text{Climatología.}$

$Z = [0, 100]$

$T(\text{Climatología}) = \{\text{Calma, Medio, Malo}\}$

$M(\text{Calma}) = \text{trapmf}(\text{Climatología}); \{-50, -40, 20, 35\}$

$M(\text{Medio}) = \text{trimf}(\text{Climatología}); \{30, 50, 70\}$

$M(\text{Malo}) = \text{trapmf}(\text{Climatología}); \{65, 80, 150, 160\}$

La forma de la función de membresía que escogemos es la forma triangular **Figura 4.18.**

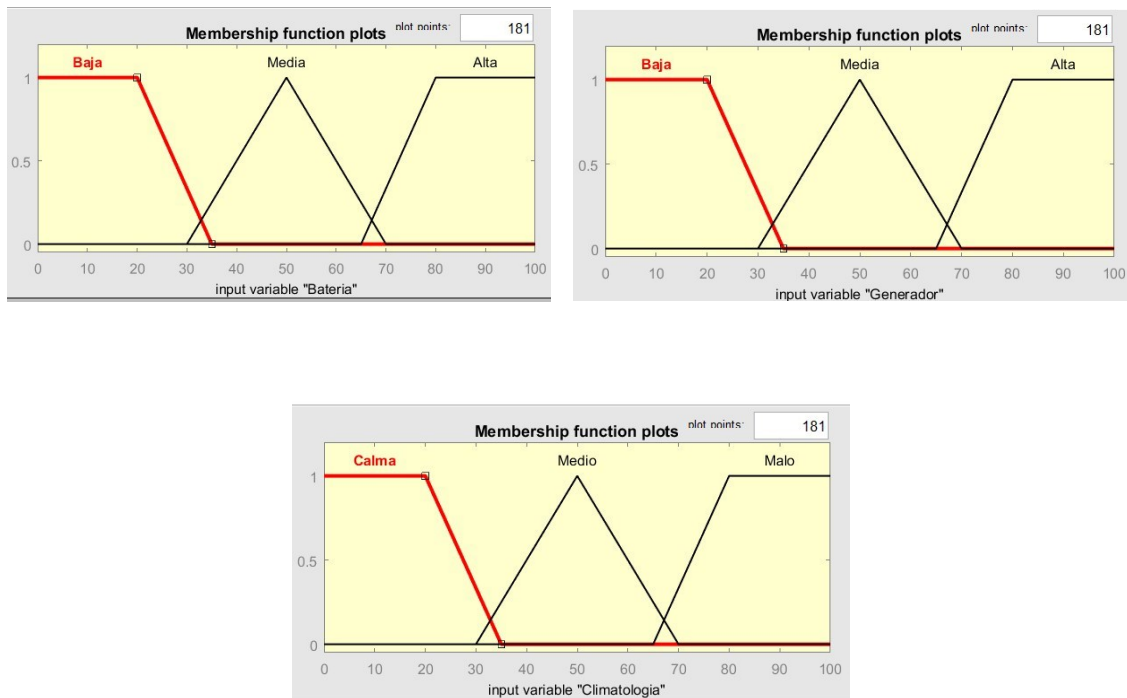


Figura 4.32: Membresías de entrada, a) Membresía de la batería, b) Membresía del Generador Solar y en c) Membresía de la Climatología.

Funciones de membresía de salida

El modelo de Fuzzy Logic Controller de Toma de Decisiones realizado en la **Figura 4.31**, para obtener los resultados de sus salidas utiliza la defuzzificación que transforma el conjunto difuso de cada salida en un valor nítido para ser utilizados en el sistema real de control por el ASV-Boya.

La función de membresía de salida está representada en la **Figura 4.33**, el eje Y es el grado de pertenencia, que describe cuantitativamente la función de membresía, siendo el eje X el valor de la señal real obtenida.

Los nombres de Lenta, Media, Alta, Corta, Mucha, Anclar, Ir de A a B y Explorar, son la significancia lingüística y describen cualitativamente las funciones de membresía. Las variables lingüísticas utilizadas en la salida del Planificador Táctico son:

Para la Velocidad:

u = Velocidad.

$U = [0, 4]$

$T(\text{Velocidad}) = \{\text{Lenta, Media Alta}\}$

$M(\text{Lenta}) = \text{trapmf}(\text{Velocidad}); \{-2, -1.6, 0.8, 1.5\}$

$M(\text{Media}) = \text{trimf}(\text{Velocidad}); \{1.2, 2, 2.8\}$

$M(\text{Alta}) = \text{trapmf}(\text{Velocidad}); \{2.5, 3.2, 6, 6.4\}$

Para la Amplitud:

$v = \text{Amplitud}.$

$V = [1, 3]$

$T(\text{Amplitud}) = \{\text{Corta, Media, Mucha}\}$

$M(\text{Corta}) = \text{trapmf}(\text{Amplitud}); \{0, 0.2, 1.4, 1.7\}$

$M(\text{Media}) = \text{trimf}(\text{Amplitud}); \{1.6, 2, 2.4\}$

$M(\text{Mucha}) = \text{trapmf}(\text{Amplitud}); \{2.3, 2.6, 4, 4.2\}$

Para el Comportamiento:

$w = \text{Comportamiento}.$

$W = [0, 1]$

$T(\text{Comportamiento}) = \{\text{Anclar, Ir de A a B, Exploración}\}$

$M(\text{Anclar}) = \text{trapmf}(\text{Comportamiento}); \{-0.50, -0.40, 0.20, 0.35\}$

$M(\text{Ir de A a B}) = \text{trimf}(\text{Comportamiento}); \{0.3, 0.5, 0.7\}$

$M(\text{Exploración}) = \text{trapmf}(\text{Comportamiento}); \{0.65, 0.8, 1.5, 1.6\}$

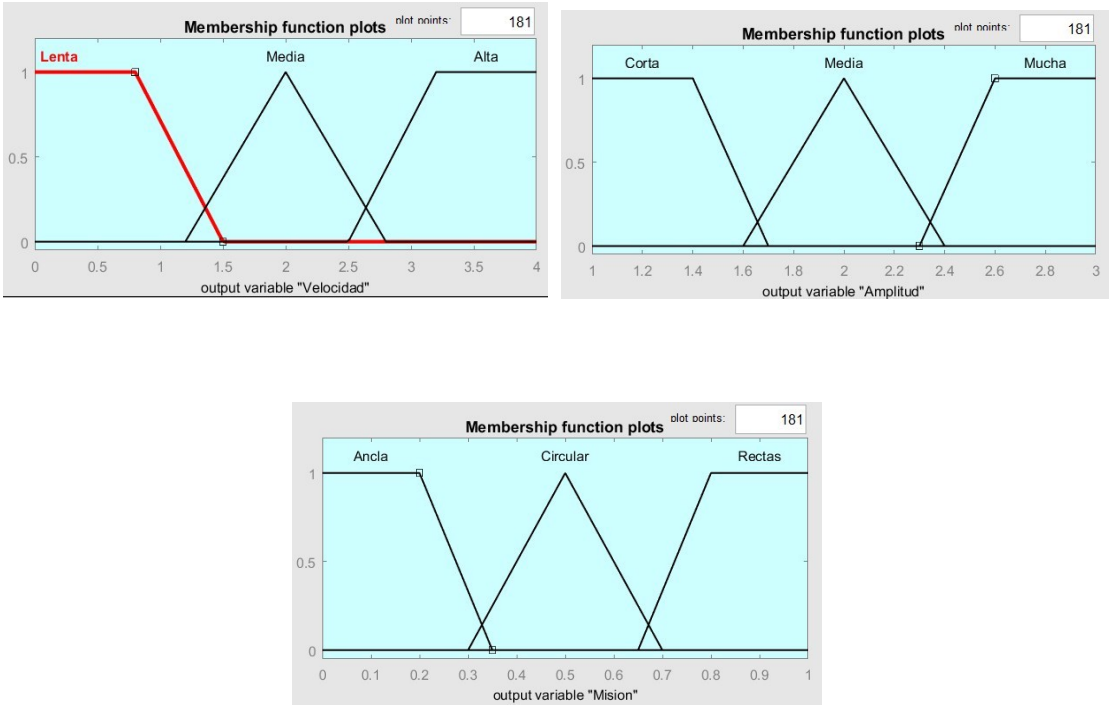


Figura 4.33: Membresía de salida de las tres variables.

Reglas difusas.

El controlador difuso debe emular el comportamiento de un piloto o experto, por eso, basándose en las funciones de pertenencia del conjunto difuso, de las entradas y salida, es necesario establecer unas reglas. Se han introducido 18 reglas de conocimiento. De las simulaciones se obtiene la respuesta del sistema difuso principal en lazo abierto, de esta manera se obtiene la estrategia de control del ASV-Boya.

La propuesta de base de las reglas de conocimiento la podemos ver en la **Tabla 4. 5**.

Tabla 4. 5. Con las18 Reglas de conocimiento utilizadas para el Nivel Táctico.

Regla	Batería	Generador	Climatología	Velocidad	Amplitud	Misión
1	-	-	MALO	LENTA	CORTA	ANCLA
2	BAJA	BAJA	-	LENTA	CORTA	ANCLA
3	BAJA	MEDIA	CALMA	MEDIA	MEDIA	CIRCULAR
4	BAJA	MEDIA	MEDIO	LENTA	MEDIA	CIRCULAR
5	BAJA	ALTA	CALMA	MEDIA	MEDIA	CIRCULAR
6	BAJA	ALTA	MEDIO	LENTA	MEDIA	CIRCULAR
7	MEDIA	BAJA	CALMA	MEDIA	MEDIA	CIRCULAR
8	MEDIA	BAJA	MEDIO	LENTA	MEDIA	CIRCULAR
9	MEDIA	MEDIA	CALMA	MEDIA	MEDIA	CIRCULAR
10	MEDIA	MEDIA	MEDIO	LENTA	MEDIA	CIRCULAR
11	MEDIA	ALTA	CALMA	ALTA	MEDIA	RECTAS
12	MEDIA	ALTA	MEDIO	MEDIA	MEDIA	RECTAS
13	ALTA	BAJA	CALMA	MEDIA	MEDIA	RECTAS
14	ALTA	BAJA	MEDIO	MEDIA	MEDIA	RECTAS
15	ALTA	MEDIA	CALMA	ALTA	MEDIA	RECTAS
16	ALTA	MEDIA	MEDIO	ALTA	MEDIA	RECTAS
17	ALTA	ALTA	CALMA	ALTA	CORTA	RECTAS
18	ALTA	ALTA	MEDIO	ALTA	CORTA	RECTAS

4.10 Resultados de la simulación y conclusiones.

4.10.1 Resultados de la simulación.

Para simular el modelo del “Gestor de Ejecución” de la **Figura 4.30**, se ha creado el bloque generador de señales “Signal Builder”, de la **Figura 4.34**, conteniendo las señales de la Batería, del Generador y de la Climatología, al objeto de introducirlas al sistema difuso, simulando señales reales.

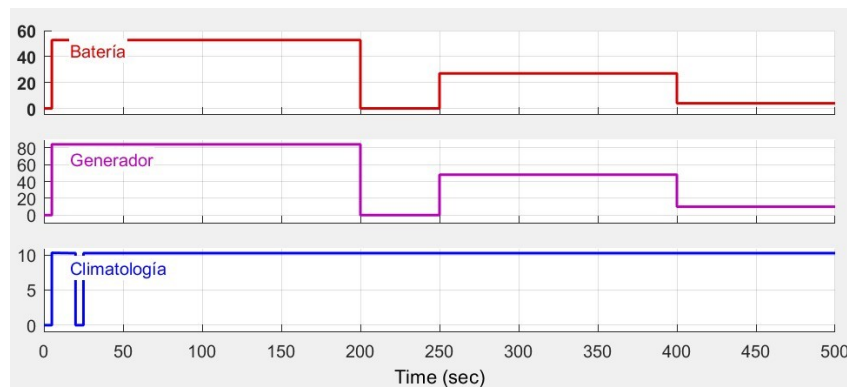


Figura 4.34: Gráficas obtenidas en el Scope “Fuzzy_Táctico” de los valores introducidos en el generador de señales “Signal Builder” al objeto de permitir realizar la simulación semejante al mundo real.

Después de realizar la simulación del modelo de la **Figura 4.35**, se aprecia que toma la decisión de ejecutar el comportamiento de “Ir de A a B”, consistente en ir a una determinada casilla a una velocidad de 2 m/s para ser explorada a continuación.

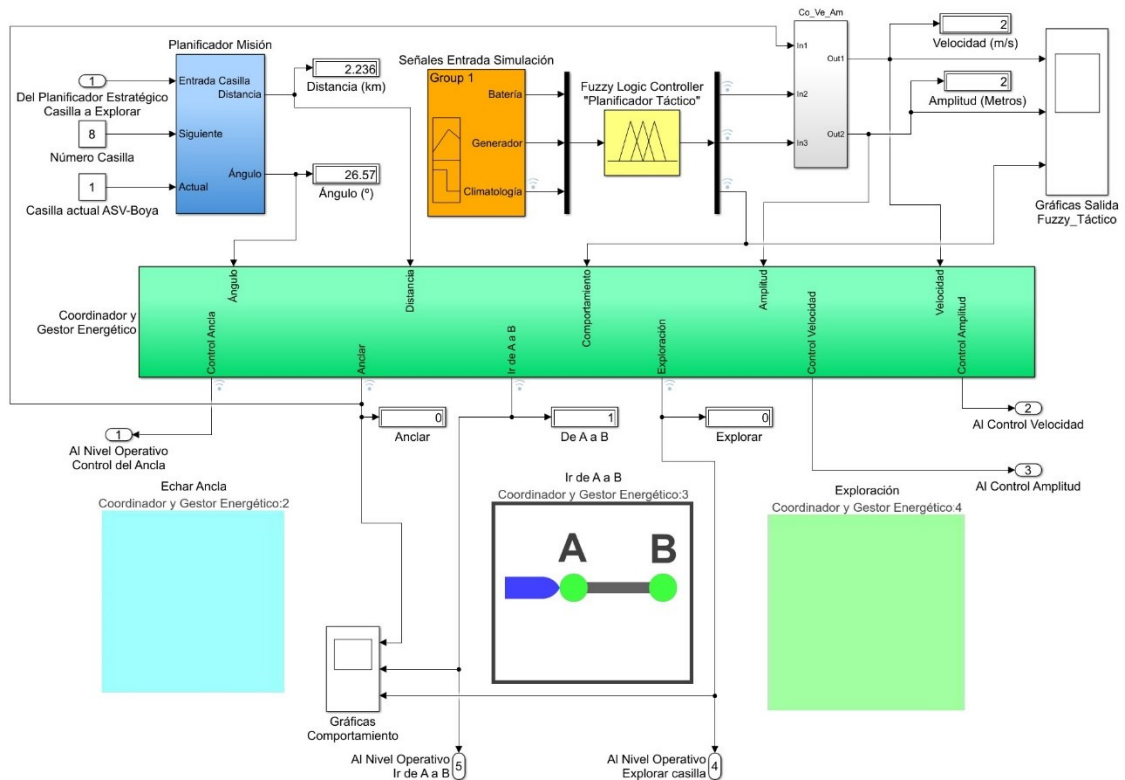


Figura 4.35: Resultado de simular el modelo del “Gestor de Ejecución”, con el comportamiento de “Ir de A a B”. Se trata de ir de la casilla 1 a la casilla 8, que se encuentra a 2.236 m, con un ángulo del trazado de la trayectoria de 26,57 °C, a una velocidad de 2 m/s.

A la salida del bloque “Planificador Táctico” se visualiza la velocidad en el Display “Velocidad (m/s)”, la amplitud en el Display “Amplitud (metros)” y las gráficas en el Scope “Salida Fuzzy_Táctico”, como se puede ver en la **Figura 4.36**.

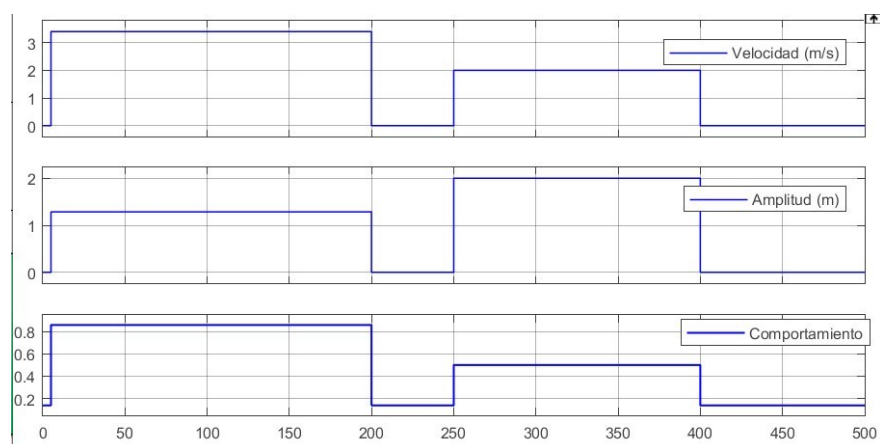


Figura 4.36: Gráficas obtenidas en el Scope “Fuzzy_Táctico” de los valores de salida del módulo “Planificador Táctico”, se aprecia la variación del comportamiento, de la velocidad y amplitud del ASV-Boya, según los valores de entrada.

En la **Figura 4.37** se pueden ver las gráficas al hacer la simulación y los datos en el Scope “Gráficas Comportamientos”.

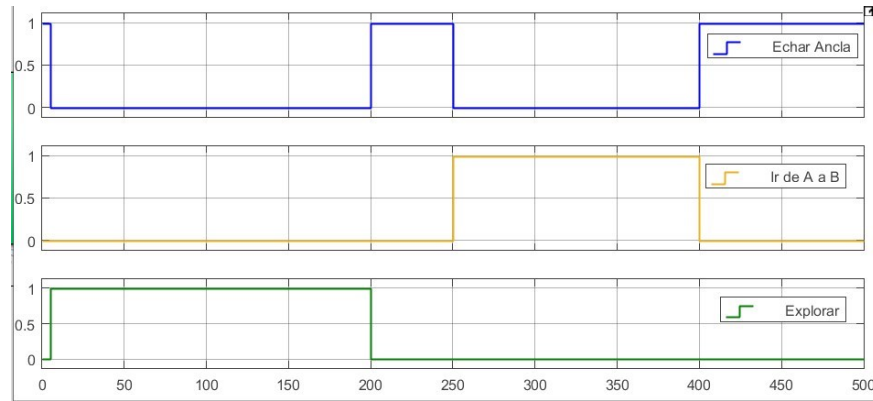


Figura 4.37: Gráficas obtenidas en el Scope “Gráficas Comportamientos” de los valores de salida del submodelo “Coordinador y Gestor Energético”, se aprecian los tres modos de comportamiento que puede realizar el ASV-Boya.

Otro de los comportamientos que puede realizar el ASV-Boya, se puede ver en el modelo de la **Figura 4.38**, donde se aprecia la decisión de ejecutar el comportamiento de “Exploración”, consistente en explorar la casilla 8, a la velocidad de 3,399 m/s y con una amplitud o separación entre recorridos de 1,285 metros.

A la salida “Exploración” del submodelo “Coordinador y Gestor Energético” se encuentra a un nivel 1, por lo que se decide enviar al módulo “Navegación Global”, del “Nivel Operativo” que debe iniciar la exploración de la casilla 8, así como a la velocidad y amplitud a la que debe realizar la exploración.

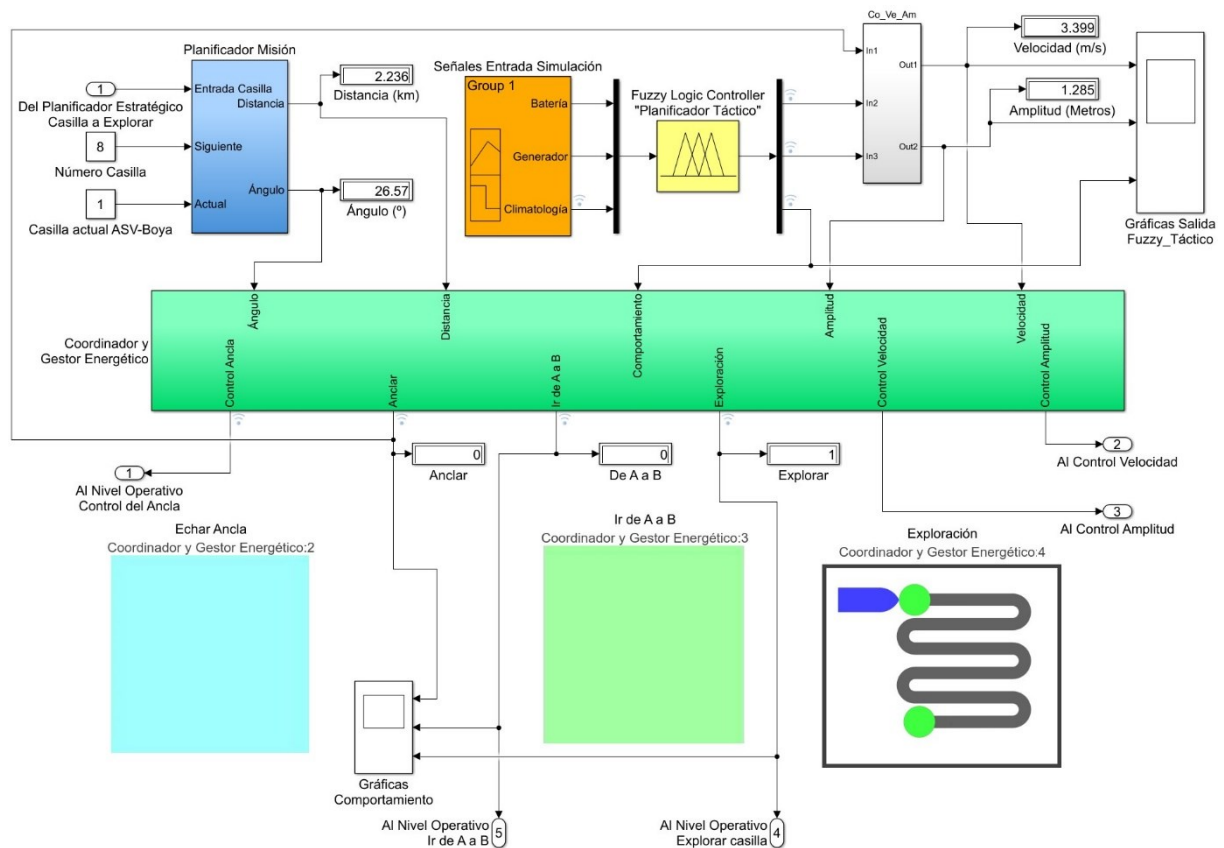


Figura 4.38: Resultado de la simulación del modelo, se obtiene en la salida la decisión de “Exploración”.

Otro de los comportamientos que puede realizar el ASV-Boya, del modelo de la **Figura 4.39**, donde se aprecia la decisión de ejecutar el comportamiento de “Echar Ancla”, consistente en parar la navegación y echar el ancla, bien para recargar sus baterías o para pernoctar.

En este caso la salida “Anclar” del submodelo “Coordinador y Gestor Energético” se encuentra a un nivel 1, por lo que se decide enviar al módulo “Navegación Global”, del “Nivel Operativo” que detenga al ASV-Boya y ponga en marcha el motor de soltar el ancla, en este caso la velocidad y amplitud valen 0.

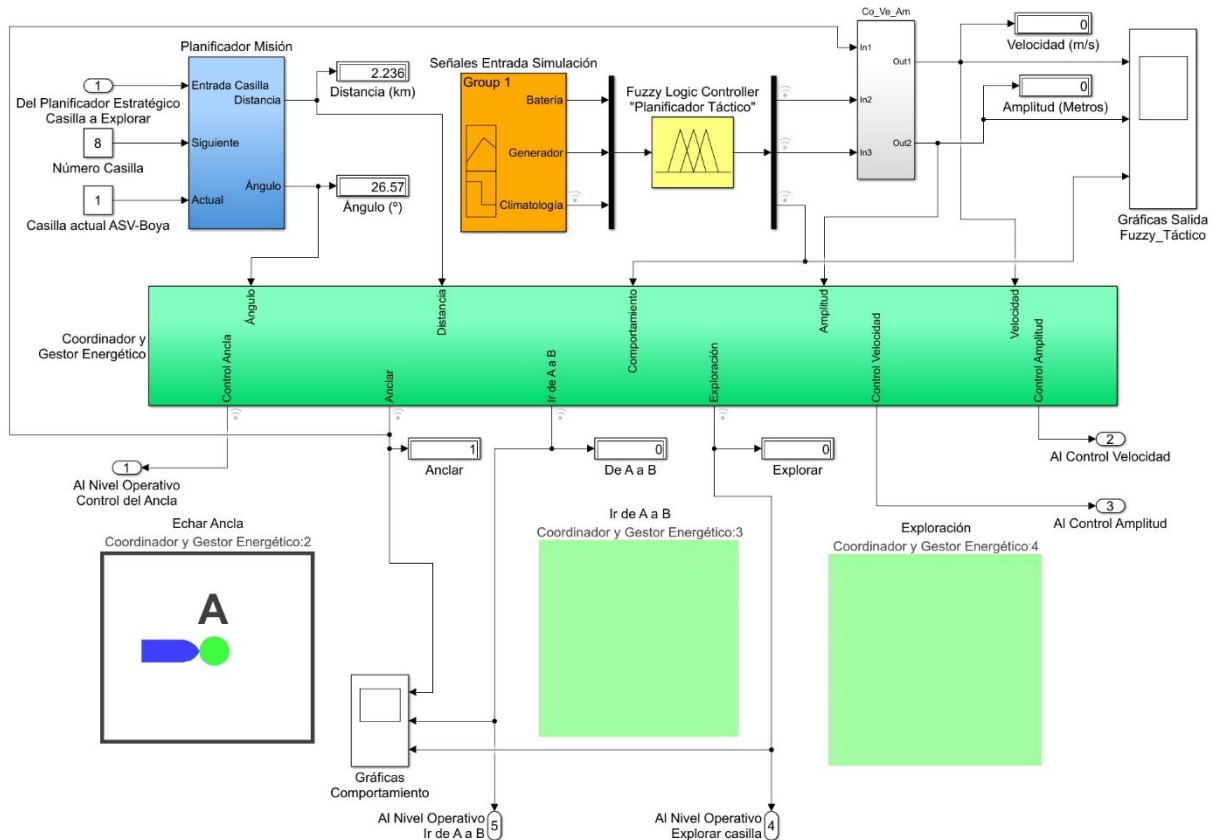


Figura 4.39: Resultado de la simulación del modelo, se obtiene en la salida la decisión de “Echar Ancla”.

4.10.2 Conclusiones.

Una vez implementada la Arquitectura de Control en el entorno de programación Matlab y realizados varios modelos mediante Simulink, se ha probado la viabilidad de la arquitectura y la estrategia de control mediante simulaciones.

Se han creado modelos que utilizan datos reales de sensores almacenados previamente de forma que se constate si la arquitectura y las estrategias de control toman las decisiones adecuadas.

Además, se crea un mapa codificado por colores que representa los niveles disueltos en el agua de sus parámetros físico-químicos como la salinidad, la temperatura, la clorofila, el oxígeno, etc.

Después de realizadas las simulaciones se verifica que los modelos creados toman las decisiones adecuadas y se obtienen los valores correctos, tal como se aprecia en los resultados de las **Figura 4.35**, **Figura 4.38** y **Figura 4.39**, donde se escogen los comportamientos correctos, como “Ir de A a B”, de “Exploración” y el de “Echar Ancla”, respectivamente.

El modelo de “Nivel Operativo” no se ha modelado en esta Tesis debido a que queda fuera del ámbito de esta tesis y está siendo abordado en otros trabajos de investigación relacionados con el software IUNO que se ha mencionado en este capítulo. Eso sí, se utilizará en la implementación de la arquitectura para el vehículo ASV-Boya en el capítulo 5, conectando las capas superiores de la arquitectura con los controladores hardware / software.

Capítulo 5 Plataforma robótica ASV-Boya

5.1 Introducción.

En este capítulo se describe la plataforma robótica utilizada como pruebas, donde en el ordenador embebido que lleva para su control, se ha implementado la arquitectura de control descrita en los capítulos anteriores, para la realización de misiones de inspección de forma autónoma en misiones de larga duración en aguas poco profundas.

También se describe en este capítulo el diseño de todo el sistema energético del ASV-Boya, como el sistema de generación de energía eléctrica mediante módulos solares fotovoltaicos, el sistema de almacenamiento de energía en baterías, los sistemas de conversión eléctrica como los reguladores de carga y los sistemas de propulsión eléctrica.

Finalmente, se presenta el sistema energético, donde se obtienen los balances de los consumos, pérdidas y generación.

Según puede verse en la **Figura 5.1**, la arquitectura propuesta en el capítulo 3 está formada por varias capas, desde un nivel superior o estratégico, hasta un nivel básico u operativo.

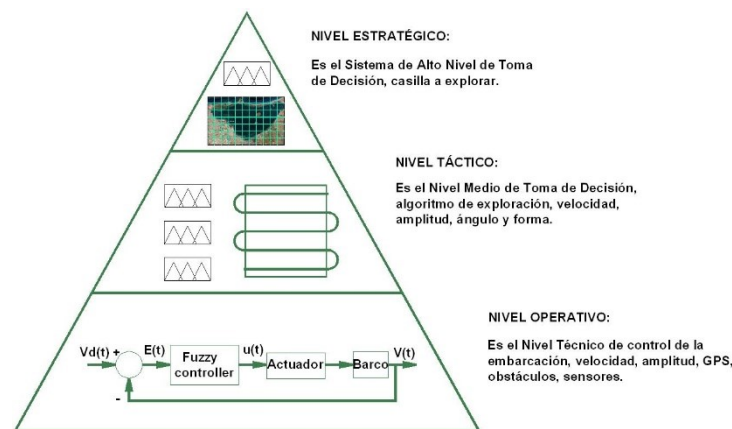


Figura 5.1: Arquitectura básica multicapa propuesta [55].

Los diferentes niveles de esta arquitectura han sido estudiados en los capítulos 3 y 4 y ahora se va a presentar la embarcación sobre la que se han realizado las pruebas y experimentos para verificar el comportamiento de la misma.

5.2 Plataforma robótica ASV-Boya utilizada para pruebas.

La plataforma robótica utilizada como pruebas es el vehículo de superficie autónomo BUSCAMOS-RobObs propiedad de la Universidad Politécnica de Cartagena, es una embarcación mono casco fabricada en poliéster reforzado con fibra de vidrio, ver **Figura 5.2**.

El casco es de 5,10 m de largo y 1,97 m de ancho. El desplazamiento del barco en condiciones normales de operación es de aproximadamente 1.000 kg, con un calado promedio de 0,325 m.

La embarcación está propulsada por dos hélices movidas por dos motores eléctricos externos independientes anclados al travesaño, donde cada propulsor se alimenta en serie por dos baterías de ion de litio de 26 V. También está equipado con un control de timón, que cambia la dirección de empuje de las hélices por medio de un motor lineal.

Esta plataforma robótica se ha modificado para utilizarla en esta tesis quitando el generador diésel, quitando el submarino robot y su cable umbilical, se ha aumentado el número de módulos solares para que sea más ligera, disponga de más generación energética y por lo tanto más autonomía de navegación. Con todos estos cambios realizados se le ha puesto el nombre de ASV-Boya.

Como se comentó en el capítulo 1, el ASV-Boya de pruebas tiene la particularidad de poder navegar de forma autónoma y aún la libertad de movimientos y capacidad de cubrir grandes áreas de exploración, con la posibilidad de anclarse al fondo marino y convertirse de ese modo en una "boya" estática, que puede seguir realizando medidas mientras recarga las baterías.



Figura 5.2: Fotografías de la embarcación ASV-Boya, usada para realizar el experimento [55].

En la **Figura 5.3** aparece el diseño en 3D de la embarcación BUSCAMOS-RobObs realizado por el autor de esta tesis en SolidWorks, modificada a ASV-Boya, vista genérica.

Se pueden ver los elementos principales de los que está constituida, como los módulos solares fotovoltaicos sobre una plataforma elevada, donde el diseño del sistema energético, el sistema propulsor y el de almacenamiento de la energía eléctrica han sido diseñados por el autor de esta tesis y es una de las aportaciones de la misma, tal como se ha comentado en el capítulo 1, punto 1.2.2, apartado 3.

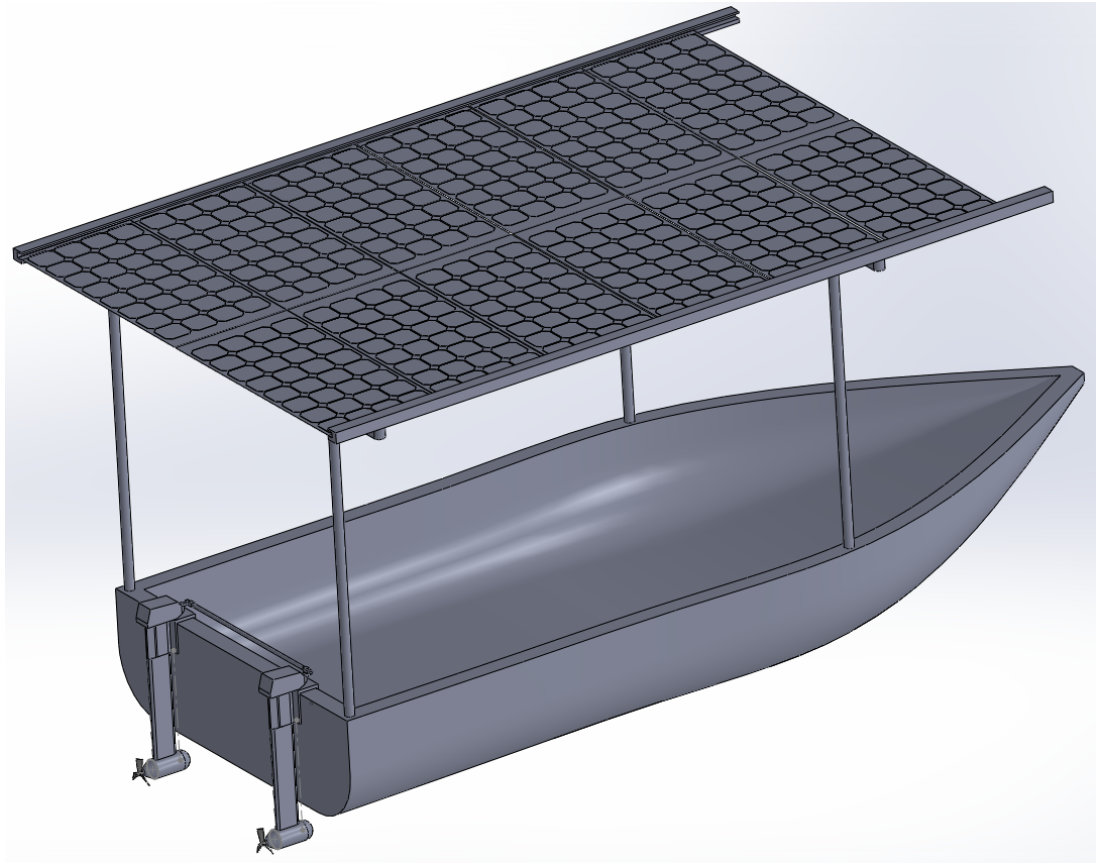


Figura 5.3: Vistas del diseño en 3D de la embarcación realizado en SolidWorks, usada para realizar los experimentos.

5.3 Hardware del ASV-Boya.

El hardware de control del vehículo autónomo ASV-Boya, se ha implementado en una serie de módulos, que por una parte son Nodos de un controlador programable National Instruments sbRIO y, por otro lado, en una CPU tradicional, en la parte de toma de decisiones.

En la **Figura 5.4**, se puede ver la arquitectura de hardware de control que consta principalmente de tres módulos, presentada y descrita en [55], cada uno con una serie de dispositivos electrónicos y tarjetas para funciones específicas. Todos los módulos están interconectados a través de un bus de campo CANopen y una red Ethernet.

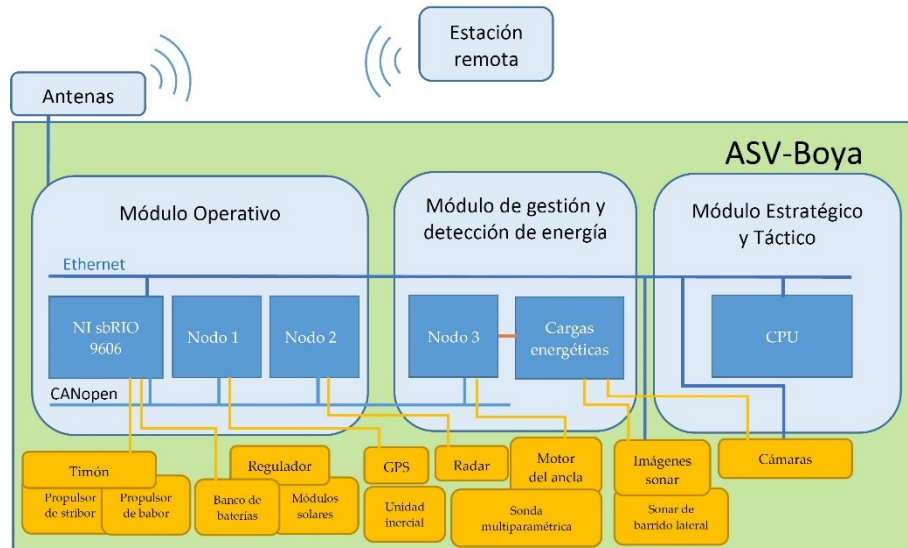


Figura 5.4: Componentes de hardware ASV-Boya y redes de comunicación [55].

El “Módulo Estratégico y Táctico” administra los algoritmos de toma de decisiones y la base de datos. Su elemento principal es una PC DFRobot LattePanda de una sola placa basada en el chip Intel Atom Cherry Trail con 4 GB de RAM y 64 GB de memoria interna.

Este módulo almacena en una base de datos MySQL las lecturas tomadas, que son utilizados por los algoritmos de toma de decisiones y, a su vez, están dispuestos para la sincronización y consulta con estaciones de comunicación terrestres.

Las funciones principales del “Módulo de gestión y detección de energía” son:

- (i) adquiere información de la sonda multiparamétrica y verifica cíclicamente su estado (operativo, requiere mantenimiento, etc.).
- (ii) controla la potencia de la cámara y el sonar.
- (iii) controla el motor de despliegue del ancla, cambia el modo del vehículo entre un vehículo autónomo, un observatorio oceanográfico fijo o la priorización de la recarga de energía.

Consiste en dos tarjetas electrónicas de diseño personalizado, una de las cuales es el tercer nodo del bus de campo CANopen y la otra una expansión de la anterior, que realiza funciones de administración de carga para los diferentes dispositivos conectados.

El tercer nodo tiene una estructura de hardware similar a los otros dos.

El “Módulo Operativo” es el principal responsable de la navegación del vehículo: control de motor, adquisición de GPS, adquisición de rumbo de unidad inercial, detección de obstáculos y seguridad. Consiste en un controlador principal sbRIO 9606 de National Instruments y dos

tarjetas electrónicas específicamente diseñadas, Nodos 1 y 2 del bus de campo CANBUS, basadas en un microcontrolador PIC 18f4685-E-PT (8 bits y frecuencia de reloj de 25 MHz).

Cada sistema electrónico de nodo incluye módulos que garantizan la funcionalidad deseada (transductor CAN-TTL, transductor de comunicación en serie, convertidores AD de precisión, reguladores de voltaje, protecciones, controladores para la gestión de motores, etc.).

En cuanto a la infraestructura de comunicaciones, ASV-Boya utiliza bus CAN, red Ethernet, WiFi y enlace de radio.

El bus de campo CANopen comunica los tres nodos con el controlador maestro sbRIO, permitiendo un intercambio de datos de proceso confiable y robusto entre el núcleo del controlador y la periferia distribuida a una velocidad suficientemente alta (500 kbps).

La red Ethernet interconecta el sbRIO con la CPU, recibiendo las instrucciones y los parámetros de navegación de acuerdo con los resultados generados en tiempo real por el algoritmo de toma de decisiones.

El vehículo se comunica con la estación terrestre a través de Wifi y radio. Está equipado con antenas Wifi omnidireccionales y radio de alta ganancia. La red TheWiFi, con su mayor ancho de banda, está diseñada para intercambiar grandes volúmenes de datos. La red de radio de bajo ancho de banda y de largo alcance garantiza las comunicaciones durante las misiones. Por razones de seguridad, ambas redes tienen redundancia en tareas críticas, como recibir instrucciones de la base, posicionar y administrar alertas.

El ASV-Boya incluye los siguientes dispositivos de detección: un radar 3G de banda ancha SIMRAD, una cámara de popa (modelo PTZ AXIS P5534-E), una cámara de proa (modelo AXIS P1435-LE), un sonar de barrido lateral (modelo Tritech SeaKing), un Sonar de imágenes (modelo Tritech Micron Sonar) y una sonda multiparamétrica (modelo YSI 6600 V2).

El sonar de exploración lateral genera las imágenes del fondo marino, mientras que el sonar de imágenes y el radar 3G se utilizan para evitar obstáculos en la superficie y debajo del agua.

La sonda multiparamétrica puede medir temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto, concentración de clorofila y nitratos.

5.4 Software del ASV-Boya.

En la **Figura 5.5** se presenta el software visto en [\[55\]](#), que muestra los diferentes bloques y algoritmos y la función que realiza cada uno, se muestra junto al nombre del algoritmo de bloque de código principal implementado.

Las etiquetas de debajo de cada bloque se dividen en dos partes separadas por un guión, donde la primera parte indica la plataforma de hardware en la que se encuentra el módulo y la segunda parte indica el software que se está ejecutando (sbRIO, N1, N2, N3, CPU).

Las flechas indican la dirección del flujo de datos y la etiqueta muestra el tipo de comunicación o conexión entre los bloques. También se muestra la capa a la que pertenece cada elemento de software.

Los elementos de hardware en la capa operativa son básicamente microcontroladores y sbRIO.

Los microcontroladores ejecutan las funciones que se muestran en la figura periódicamente, activadas por tiempo o evento. Por ejemplo, lecturas CAN cada 10 ms, conversiones de AD cada 5 ms, watchdog cada 250 ms, adquisición RS232 cada 250 ms.

Los algoritmos y/o funciones que se muestran en la figura son los más importantes que ejecuta cada elemento de hardware.

En el caso de los elementos de software que se ejecutan en la CPU (que pertenecen a la capa Estratégica y Táctica) en el sistema operativo Windows 10 LTSB, los módulos de software que se muestran en la figura son programas que se ejecutan en esta plataforma.

Los elementos hardware de la parte operativa los microcontroladores sbRIO se han programado las estrategias de control e implementado en “LabVIEW”.

Los elementos software de la CPU son módulos que se han programado en C/C++, donde se han implementado las funciones básicas que se habían simulado en el capítulo 4.

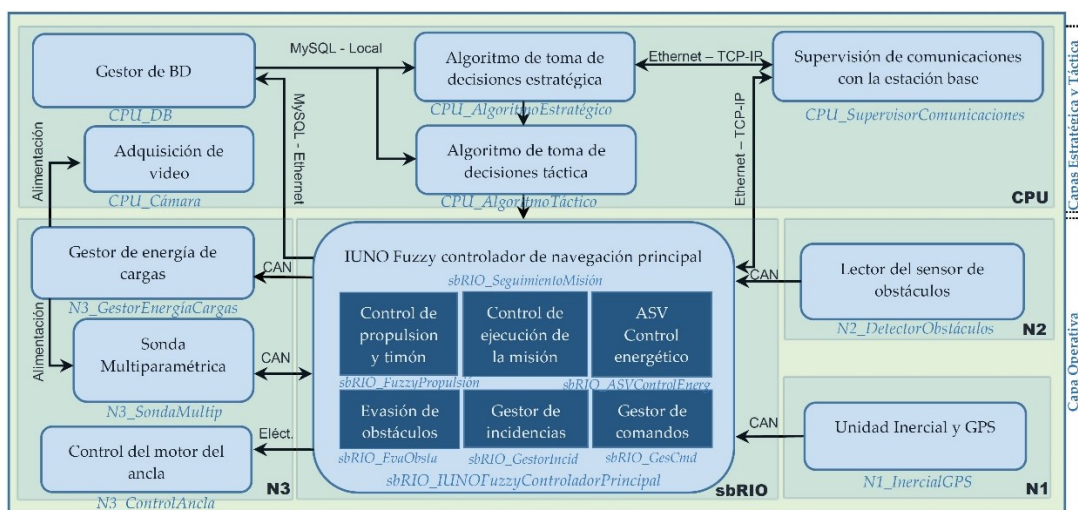


Figura 5.5: Esquema de bloques y Algoritmos del Software utilizado en la embarcación [55].

Esta plataforma es lo suficientemente poderosa como para ejecutar algoritmos de toma de decisiones Fuzzy y en tiempo real, así como para administrar la base de datos MySQL, hacer verificaciones periódicas de las comunicaciones y otros procesos de menor prioridad.

A continuación, se ofrece una breve descripción de algunos de los módulos de software involucrados en el control:

- CPU_AlgoritmoEstratégico: toma las decisiones estratégicas.
 - CPU_AlgoritmoTáctico: gestiona la toma de decisiones tácticas.
 - N1_InercialGPS: obtiene y valida la posición GPS y el curso de la unidad inercial.
 - N2_DetectorObstáculos: detecta obstáculos y envía alertas a sbRIO.
 - N3_GestorEnergíaCargas: gestiona las cargas fungibles y los modos de energía (boya, recarga, ASV)
 - N3_SondaMultip: adquiere y supervisa la sonda multiparamétrica y el sónar.
 - N3_ControlAncla: gestiona el ancla en función del modo energético activo.
 - CPU_DB: administra la conexión con la base de datos MySQL y los datos almacenados en ella (navegación georreferenciada y datos del sensor), que luego utilizan los algoritmos de toma de decisiones.
 - CPU_SupervisorComunicaciones: gestiona el enlace de comunicación con la estación base.
 - CPU_Cámara: gestiona las cámaras de a bordo.
 - sbRIO_IUNOFuzzyMainControladorPrincipal: conjunto de software que implementa el nivel operativo descrito anteriormente a través de las siguientes funciones:
 - # sbRIO_FuzzyPropulsión: implementa algoritmos difusos para corregir el rumbo y la velocidad del ASV, así como un factor K adaptable automáticamente para los PID.
 - # sbRIO_SequimientoMisión: supervisa la ruta de la misión. Junto con el primero, ambos constituyen el controlador de navegación difuso.
 - # sbRIO_ASVControlEnergy: controlador de gestión de energía.
 - # sbRIO_EvaObsta: genera una nueva ruta cuando el nodo N2 detecta un obstáculo.
 - # sbRIO_GestorIncid: envía incidentes a la estación base (errores y alertas), dependiendo de su gravedad. Gestiona la auto-restauración de algunos incidentes solucionables.
-

sbRIO_GesCmd: gestiona la conexión y la interfaz con la estación base, enviando y recibiendo comandos.

En el siguiente apartado se describe la estación y el software IUNO, al no es parte de la arquitectura y estar fuera del ASV-Boya.

En el capítulo 3 se ha presentado y descrito la Arquitectura de Control diseñada en esta tesis, se muestra la misma en la **Figura 5.6** para realizar una comparación de lo diseñado a lo que se ha podido implementar en el hardware disponible del ASV-Boya.

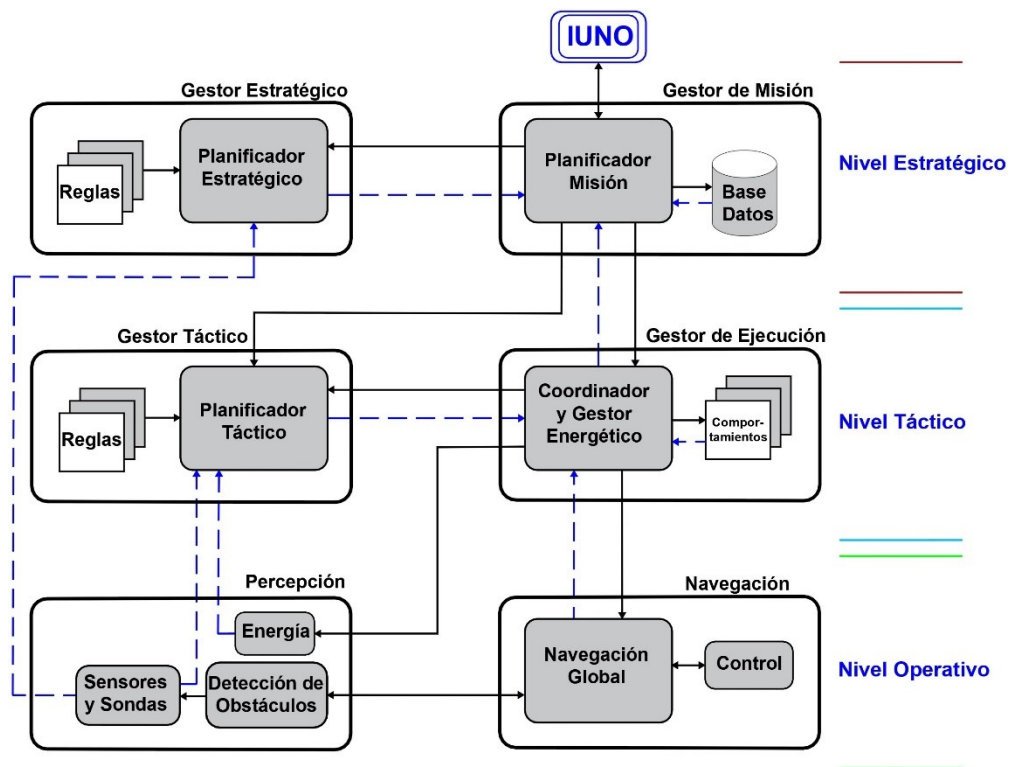


Figura 5.6: Arquitectura de Control presentada en el capítulo 3.

El Software sigue la estructura de módulos del esquema presentado en la figura 3, del capítulo 3, por lo tanto, se ha adaptado para el hardware disponible e implementado.

Se puede observar en la **Figura 5.5**, que de la arquitectura propuesta en el capítulo 3 y de las pruebas que se hicieron de la misma y de las simulaciones que se mostraron en el capítulo 4, en la **Tabla 5.1** se observa la comparación entre los diferentes módulos del software implementado.

Tabla 5.1. Comparativas entre los módulos de la Arquitectura propuesta en esta tesis en el capítulo 3, con los bloques y módulos de la arquitectura implementada en el ASV-Boya de la Figura 5.9.

Arquitectura implementada en el ASV-Boya	Arquitectura propuesta capítulo 3
Algoritmo de toma de decisiones estratégica	Gestor Estratégico
Supervisión de comunicaciones con la estación base	Planificador Misión
Gestor de BD	Planificador Misión y Base Datos
Adquisición de video	Sensores y Sondas
Algoritmo de toma de decisiones táctica	Gestor Táctico
IUNO Fuzzy controlador de navegación principal	Navegación
Gestor de energía de cargas	Energía
Sonda Multiparamétrica	Sensores y Sondas
Control del motor del ancla	Control
Lector del sensor de obstáculos	Detección de Obstáculos
Unidad Inercial y GPS	Sensores y Sondas
Control de propulsión y timón	Control
Control de ejecución de la misión	Coordinador y Gestor Energético
ASV control energético	Gestor Energético y Energía
Evasión de obstáculos	Detección de Obstáculos
Gestor de incidencias	Coordinador y Gestor Energético
Gestor de comandos	Coordinador y Gestor Energético

5.5 Estación de comando, control, comunicación y computación: IUNO.

La “Interfaz para drones no tripulados” (IUNO) es el software de control de la estación base, en el que los operadores humanos planifican y envían misiones a la ASV, en la **Figura 5.7** se muestra una captura de pantalla del software IUNO, presentada también en [55].

Fue diseñado con el propósito de simplificar la gestión de vehículos no tripulados mediante el análisis de los datos recopilados por los vehículos y proporcionar una respuesta de gestión de vehículos totalmente automatizada para garantizar el éxito de la tarea.

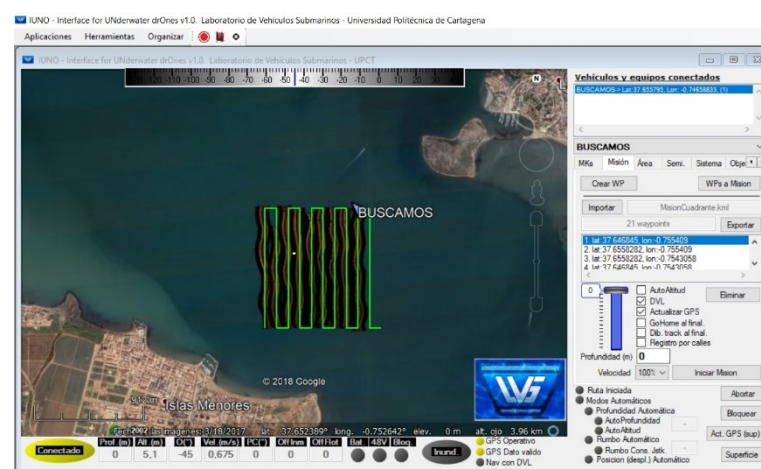


Figura 5.7: Interfaz gráfica de usuario del software IUNO, que muestra las rutas de exploración de una casilla de 1 km por 1 km dadas por las cuatro coordenadas geográficas (UTM) P1 (30T 690 4180), P2 (30T 690 4179), P7 (30T 691 4180) y P8 (30T 691 4179).

IUNO tiene una interfaz gráfica de usuario, que muestra al operador toda la información de navegación (ubicación del vehículo, consumo de energía y almacenamiento, pistas históricas y pistas programadas, etc.). En la **Figura 5.8** se puede ver una fotografía de un operador usando el IUNO en una estación base.



Figura 5.8: Fotografía de un investigador usando IUNO en un experimento. (Cortesía UPCT).

IUNO tiene una amplia gama de funciones, siendo la más importante: gestión de varios vehículos, sintetizador de voz, evento de alarma, ubicación geográfica y planificador de misión, modo de navegación rápida que cubre la ubicación geográfica planificada dada por coordenadas (latitud y longitud), objetivos y dos modos de navegación manual y semiautomáticos.

Los modos de navegación están sincronizados con el sonar a bordo y el localizador de GPS y también incorporan tablas náuticas OpenCPN (.bsb, .kap, .map) para facilitar la gestión del vehículo.

Todos los parámetros medidos se almacenan y envían a bases de datos remotas con un marcador de ubicación estándar de Keyhole Markup Language (KML) y Keyhole Markup Zip (KMZ), ampliamente utilizado, por ejemplo, en Google Earth.

Al ser una estación de comando y control, IUNO puede lanzar nuevas misiones a cualquiera de los vehículos que está coordinando, mientras que al mismo tiempo el operador humano puede cancelar cualquiera de las misiones asignadas a cualquiera de los vehículos.

5.6 Sistema de gestión de energía.

La embarcación en el modo de funcionamiento normal, a velocidad de 2 nudos/hora, tiene un consumo de alrededor de 1.802 Wh. Como los módulos solares fotovoltaicos están colocados en posición horizontal sobre la embarcación, no generan toda la energía necesaria para propulsar la embarcación de forma directa desde el generador fotovoltaico, los módulos

proporcionan 1.040 Wh y la embarcación consume 1.802 Wh, por lo tanto, se plantea el problema de obtener la energía suficiente para que pueda navegar y ejecutar una misión de exploración.

Se resuelve este problema almacenando la energía obtenida en 4 baterías de 26 Voltios y 104 Amperios/unidad, distribuidas en 2 baterías en serie para cada motor propulsor, que proporciona una energía almacenada de 5.408 Wh, al ser 2 equipos, se dispone de una energía almacenada total de 10.816 Wh, de esta manera se consigue una autonomía de 6 horas de navegación según la **Ecuación (6)**:

$$\text{Autonomía} = 10.816 \text{ Wh} / 1.802 \text{ Wh} = 6 \text{ horas} \quad (6)$$

El proceso de carga de las baterías consiste en que la embarcación queda anclada en estado de reposo y letargo con un mínimo consumo, el sistema generador fotovoltaico va recargando las baterías y cuando están a plena carga, el sistema de control despierta e inicia el proceso de exploración hasta que la energía de las baterías está a un nivel mínimo, después en ese lugar, vuelve a una posición de reposo y letargo y se repite el proceso.

La configuración del sistema energético es una instalación solar autónoma típica. El ASV-Boya utiliza un sistema con ocho módulos fotovoltaicos integrados en el techo de la embarcación.

En primer lugar se calculan los consumos de los equipos eléctricos y electrónicos que vayan a operar en la embarcación, para ello se confecciona la **Tabla 5.2**.

Tabla 5.2. Elementos eléctricos y electrónicos de la embarcación, consumos, horas de funcionamiento y energía consumida.

ELEMENTO	UNIDADES	POTENCIA (W)	HORAS (h)	ENERGÍA (Wh)	SIMULTANEIDADES (1 HORA)
MOTORES, Pod's	2	4.000	1	8.000	8.000
MOTORES DE RECOGIDA VERTICAL DEL PLUTO	1	100	0,25	25	-
MOTORES DE RECOGIDA HORIZONTAL DEL PLUTO	1	100	0,25	25	-
BOMBAS DE ACHIQUE	3	100	0,5	150	150
SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES	1	100	1	100	100
SISTEMAS AUXILIARES	1	100	1	100	100
ILUMINACIÓN	1	150	1	150	150
SISTEMA CENTRAL DE NAVEGACIÓN	1	25	1	25	25
			TOTAL	4.750	8.525 Wh

A partir del consumo energético teórico E_t (Wh), se calcula el consumo energético real E (Wh), necesario para hacer frente a los múltiples factores de pérdidas que van a existir en la instalación fotovoltaica, con la **Ecuación (7)**:

$$E = \frac{E_t}{R} \quad (7)$$

Donde R es el parámetro de rendimiento global de la instalación, definido por la **Ecuación (8)**:

$$R = (1 - kb - kc - kv) * \left(1 - \frac{ka}{Pd}\right) \quad (8)$$

Donde:

Kb: Coeficiente de pérdidas por el rendimiento del acumulador, está en 0,05

Kc: Coeficiente de pérdidas en el inversor, se coge 0,019

Kv: Coeficiente de pérdidas varias, cableado, conexiones, etc., se coge 0,1

Ka: Coeficiente de autodescarga diario, se coge 0,005, para baterías estacionarias.

Pd: Profundidad de descarga diaria de la batería, suele ser del 80%

El resultado de R se obtiene con la **Ecuación (9)**:

$$R = (1 - 0,05 - 0,019 - 0,1) * \left(1 - \frac{0,005}{0,7}\right) = 0,825 \quad (9)$$

Luego el consumo energético real se obtiene con la **Ecuación (10)**:

$$E = \frac{8525}{0,825} = 10.333 \quad (10)$$

Con la **Ecuación (11)**, se obtiene la capacidad de las baterías C (Ah):

$$C = \frac{E}{V * Pd} = \frac{10.333}{52 * 0,8} = 159Ah \quad (11)$$

Donde V es la tensión nominal de las baterías, en este caso V = 52 Voltios.

Se escoge la batería con la capacidad igual o superior a la calculada y encontramos las Baterías Monobloque 26 Voltios, de 104 Ah, colocadas en agrupaciones de 2, en serie y cada agrupación de 2 baterías en paralelo, proporciona una tensión total de 52 Voltios y una intensidad de 416 Amperios.

Se calcula ahora la intensidad del regulador, teniendo en cuenta la siguiente distribución de módulos, donde se colocan dos agrupaciones en paralelo, de 4 módulos en serie/cada una, proporciona una intensidad máxima de 16,20 A y una tensión máxima de 67,44 voltios, tal como se muestra en la **Ecuación (12)** y en la **Ecuación (13)**:

$$I_{sc} = I_{sc1} * N_p = 8,61 * 2 = 16,20A.h \quad (12)$$

$$V_{oc} = V_{oc1} * N_s = 16,86 * 4 = 67,44V \quad (13)$$

Donde:

I_{sc} = Intensidad de cortocircuito de la instalación, en A

I_{mpp} = Intensidad en el punto de máxima potencia de los paneles, en A.

V_{oc} = Tensión en circuito abierto de la instalación, en V.

V_{mpp} = Tensión en el punto de máxima potencia de los paneles, en V.

N_p = Número de paneles en paralelo (4).

N_s = Numero de grupos en serie (2).

Se escoge un regulador de carga FLEXmax de 30 A / 120 V.

En la **Tabla 5.3** se pueden ver los componentes de que está constituido el sistema energético.

Tabla 5.3. Componentes principales de la embarcación usada para el experimento.

Ítem	Descripción	Valor	Peso(Kg)
1	Módulos fotovoltaicos ENECOM ITALIA s.r.l, de 130 Wp	14 de 130 W	14x2,2=30,8
2	Regulador FLEXmax 80A, y 24V	1 de 80 A	5,3
3	Baterías Monobloque VITRON ENERGY 12 Volt Deep Cyde GEL de 165 Ah	4 de 165 A	4x48=192
4	Convertidor VITRO ENERGY AC/DC	1	50
5	Kit de instalación: cableado, cajas de conexiones, etc.	1	-
6	Estructura Soporte	1	20
	TOTAL		550

5.6.1 Esquema unifilar.

En la **Figura 5.9**, se puede ver el esquema unifilar del sistema energético de la embarcación, se aprecia el generador solar, compuesto por 8 módulos solares, los dos reguladores de carga solar, las 4 baterías de litio y los dos equipos propulsores, así como la posición de los sensores de energía necesarios para saber en cada momento la energía que pasa por cada zona.

Los 8 módulos solares se dividen en 2 grupos conectados en paralelo, de 4 módulos en serie cada uno, las baterías se dividen en dos grupos independientes de 2 baterías conectadas en serie en cada grupo, para conseguir la tensión de funcionamiento de los propulsores, en cada grupo de baterías se utiliza un regulador de carga solar independiente.

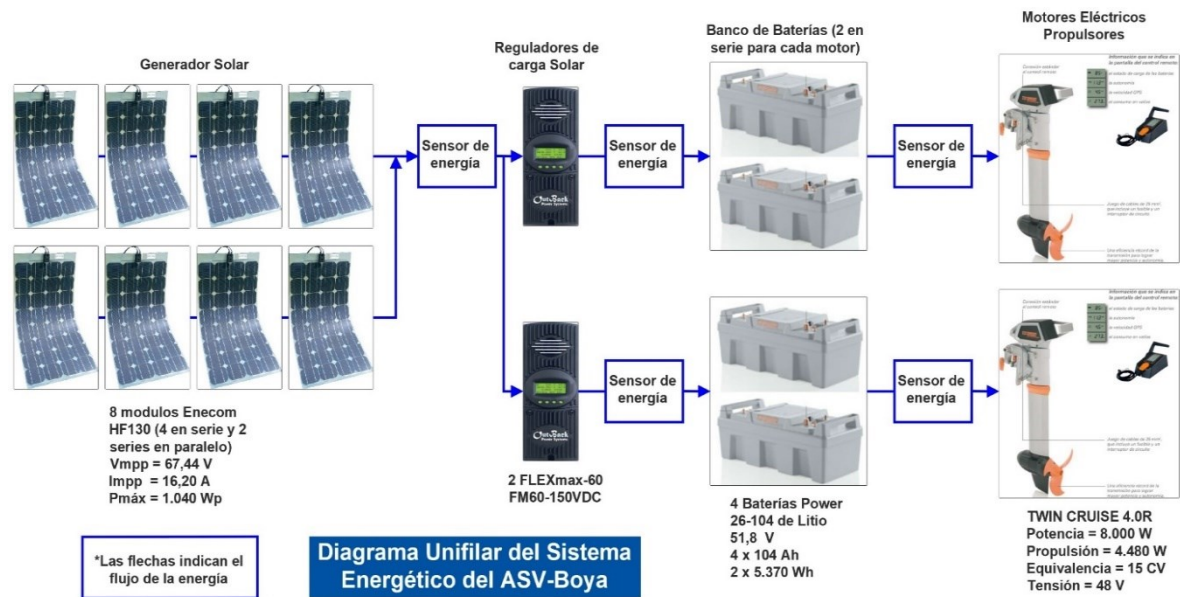


Figura 5.9: Esquema unifilar.

5.6.2 Diseño del sistema eléctrico.

Para diseñar el sistema energético utilizamos el esquema eléctrico del ASV-Boya de la **Figura 5.10**, donde se aprecian los módulos solares, reguladores de carga, baterías, motores propulsores, el cuadro general de distribución, los elementos de seguridad como fusibles, interruptores magnetotérmicos y secciones del cableado.

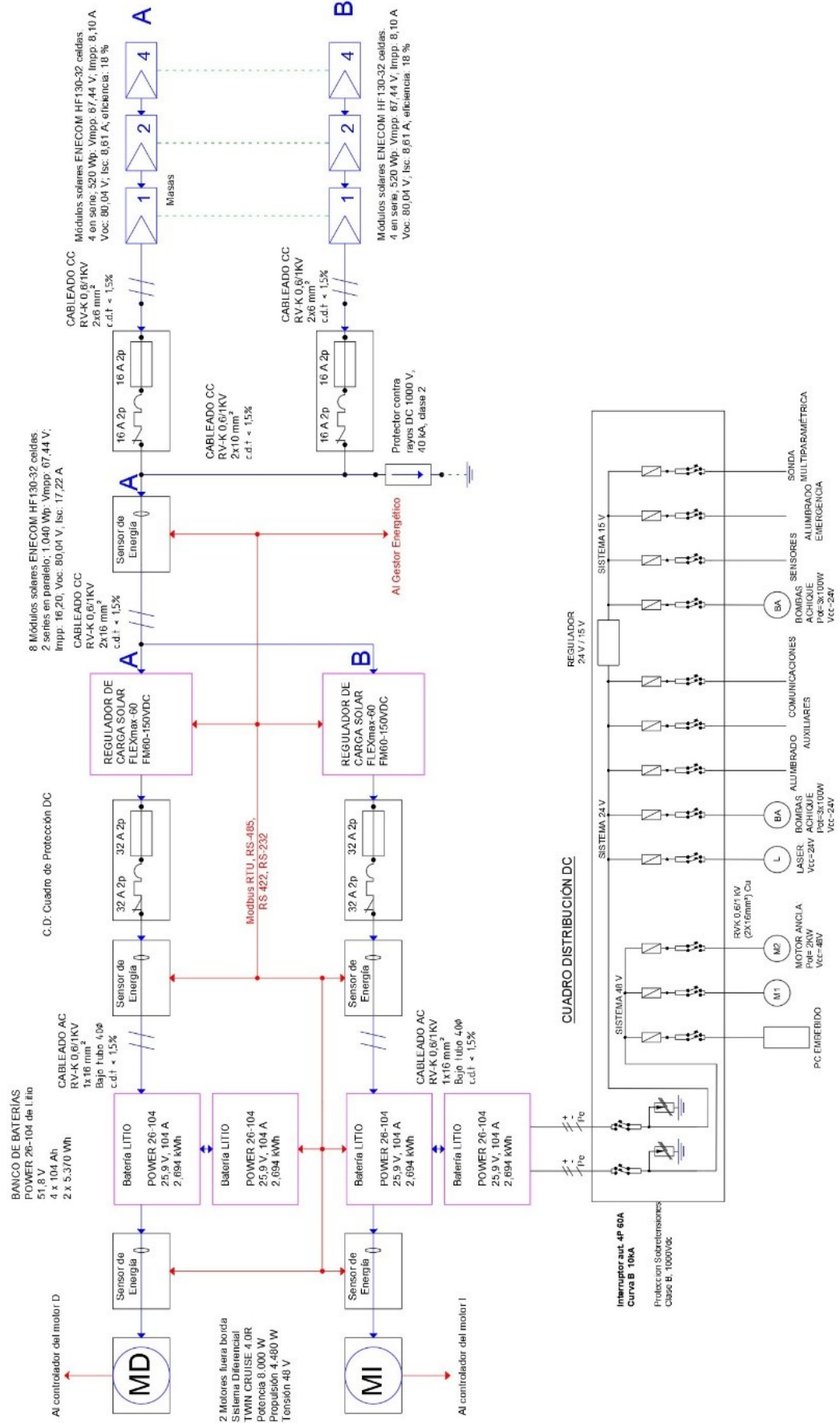


Figura 5.10: Esquema eléctrico.

5.6.3 Módulos solares.

Se utilizan 8 módulos solares fotovoltaicos flexibles de la marca Enecom fabricados con células en silicio monocristalino de alta eficiencia, superior al 18 %, en la **Figura 5.11**, se puede ver una fotografía de los mismos.

Las características técnicas de estos módulos hacen que estén especialmente indicados para el sector marino que requiere el uso de materiales flexibles, irrompibles, resistentes, impermeables y ligeros.

Los módulos se producen con una tecnología exclusiva que le permite no temer los daños causados por vibraciones o altas temperaturas. El montaje se puede hacer o pegando o mediante un método innovador, llamado bloqueo dual, que permite enganchar los módulos a la superficie gracias a un sistema similar al de velcro.

Los módulos se pueden curvar con una flecha hasta un 30 % de su longitud y, si están montados en una superficie dura, se puede caminar sobre ellos. Además, los módulos, la caja de conexiones y los cables de conexión son resistentes a los rayos UV y son completamente impermeables.



Figura 5.11: Paneles solares.

Las características eléctricas técnicas de estos módulos las podemos ver en la **Tabla 5. 4**.

Tabla 5. 4. Características de los módulos solares utilizados por la embarcación.

Características	
Marca y modelo	Enecom Italia, HF130
Unidades	8 módulos
Potencia máxima	130 (Wp)
Voc	20.01 (V)
Vmpp	16.86 (V)
Isc	8.61 (A)
Impp	8.10 (A)

5.6.4 Sistema de almacenamiento. Baterías.

El banco de baterías proporciona una corriente y un voltaje estables al eliminar los transitorios y proporciona las corrientes que se requieren.

La Power 26-104 es una batería de litio fiable en todo momento, se puede ver en la **Figura 5.12**.

Su versatilidad única responde a un amplio concepto de protección frente a cortocircuitos, sobrecarga, fuerte descarga e inversión de la polaridad, y a una eficiencia insuperable: 2.685 Wh con un peso de tan sólo 25 kg (107 Wh/kg).

La batería es completamente estanca (IP67) y en caso de inmersión completa la tensión se corta a nivel de los bornes para evitar la corrosión electrolítica y la formación de gas detonante.

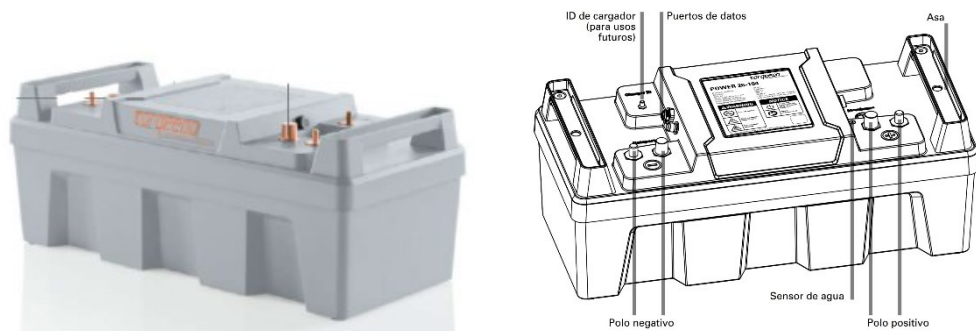


Figura 5.12: Baterías.

Las fotografías de la **Figura 5.13**, se pueden ver 2 de las baterías colocadas dentro de la embarcación.

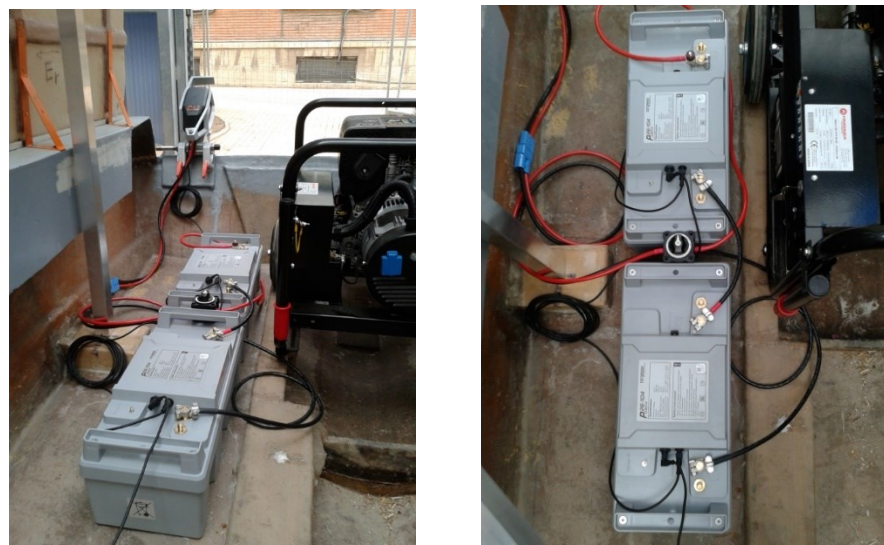


Figura 5.13: Baterías. (Cortesía UPCT).

5.6.5 Sistema de propulsión. Motores fuera borda.

Para la propulsión de la embarcación se utilizan se utilizan dos propulsores eléctricos de la marca Torqeedo, Modelo CRUISE 4.R, que van unidos por una barra horizontal.

El esquema eléctrico de las conexiones entre los propulsores, las baterías y el sistema de control de la velocidad se puede ver en la **Figura 5.14**.

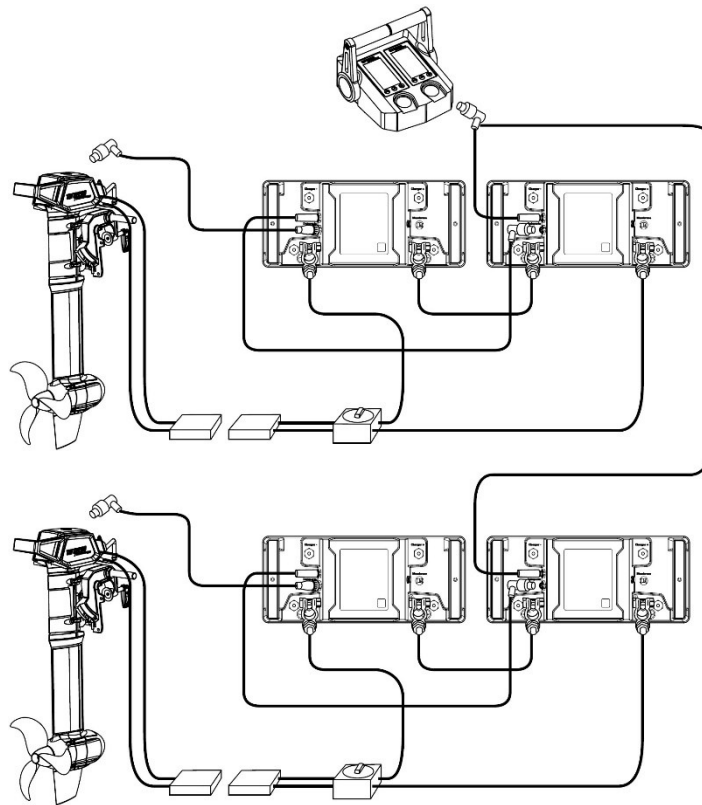


Figura 5.14: Esquema eléctrico del sistema propulsores y baterías.

La potencia de entrada de cada uno es de 4.000 vatios, potencia de propulsión equiparable a la de un fuera borda de gasolina de 8 CV, potencia total de 8.000 vatios y 15-16 CV.

Ordenador de a bordo integrado con cálculo de distancia en base a GPS.

En la **Figura 5.15**, se puede ver una imagen del propulsor utilizado y la información que proporciona la pantalla digital que lleva en el mando de control.



Figura 5.15: Sistema de propulsión eléctrica, motores fuera borda Torqeedos.

En la **Figura 5.16** se aprecia la colocación de los dos propulsores sobre la popa de la embarcación, van unidos al barco mediante unos anclajes y después se unen entre sí mediante una barra horizontal, que les permite girar a la vez, en paralelo, mediante el control del timón.



Figura 5.16: Propulsores eléctricos colocados sobre la popa de la embarcación. (Cortesía UPCT).

5.6.6 Reguladores de carga.

Los reguladores de carga de las baterías se colocan entre los módulos solares y el banco de baterías tal como aparece en la **Figura 5.9** y **Figura 5.10**.

Estos dispositivos electrónicos ajustan las tensiones de salida de los módulos solares al estado del banco de baterías, aplicando la tecnología de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), obteniendo en todo momento la máxima energía de los módulos solares.

Se utilizan 2 reguladores marca FLEmax-60, de 60 amperios y rango de 60-150 Vdc, como los que aparecen en las fotos de la **Figura 5.17**.

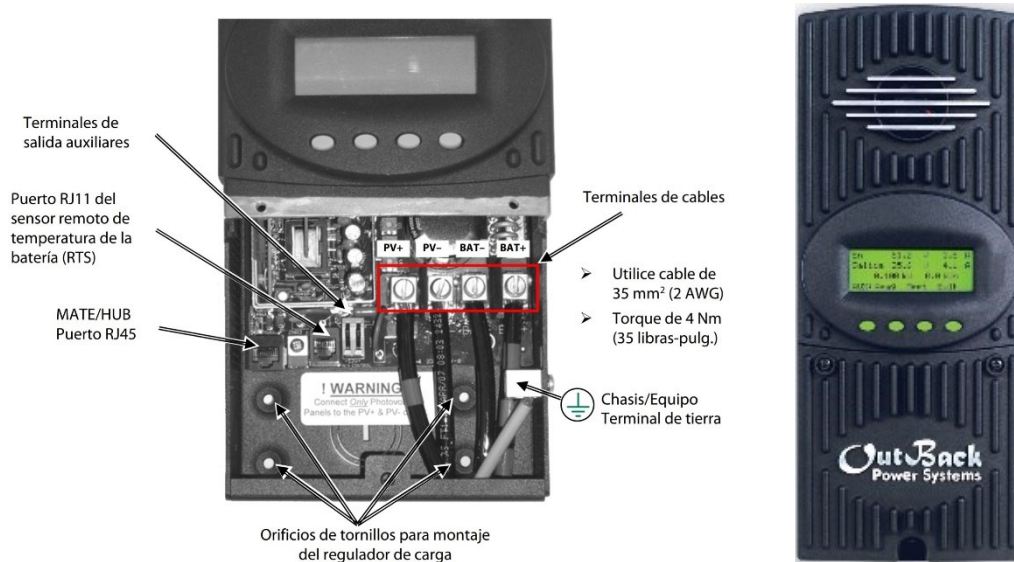


Figura 5.17: Regulador de carga FLEmax.

En la **Figura 5.18**, podemos ver varios dispositivos electrónicos como los reguladores de carga e inversores que permiten elevar la tensión.



Figura 5.18: Dispositivos electrónicos y reguladores sobre la embarcación. (Cortesía UPCT).

5.6.7 Reguladores de 24 V/15 V y 24 V/5 V.

Son dispositivos de estado sólido que reducen la tensión a valores adecuados para equipos que necesitan unas tensiones más reducidas para su funcionamiento, en este ASV-Boya usa reguladores con entrada de 24 Vdc y salidas de 15 Vdc / 10 A /150 W y 5 Vdc / 5A /25 W, protecciones IP67, donde en la **Figura 5.19** se expone un esquema y fotos de estos reguladores.



Figura 5.19: Reguladores reductores de tensión.

5.6.8 Sensores de energía.

Son dispositivos de estado sólido que utilizan el Efecto Hall que al pasar una intensidad a través de sus entradas se obtiene una tensión o intensidad en su salida proporcional a la intensidad que pasa por la entrada. Se utiliza el modelo ACS758ECB-200B, capaz de soportar 200 Amperios, en la **Figura 5.20**, se puede ver un esquema de conexiones y una foto de este sensor.

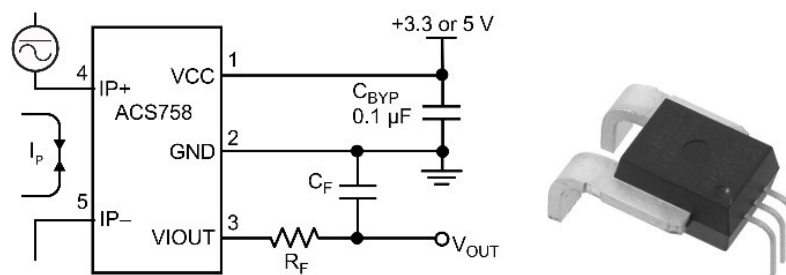


Figura 5.20: Sensor de energía.

5.6.9 Mando del control de la velocidad.

Consiste en un doble mando conectado en paralelo tal como se ve en la foto de la **Figura 5.21**, tiene la finalidad de actuar sobre los 2 motores propulsores a la vez, al llevar un canal de comunicaciones con un ordenador, permite conectarse con el Controlador de Velocidad del Sistema Operativo para regular la velocidad de ambos propulsores. Se comercializa en conjunto con los 2 Toorqedos propulsores, con el modelo CRUISE 4.R.



Figura 5.21: Mando doble para actuar sobre los 2 motores eléctricos.

5.7 Generación energética.

Los datos ambientales (la irradiación y la temperatura promedio diaria) son proporcionados por METEONORM V6.1.0.23, que es una base de datos completa; los datos se obtuvieron para la ciudad de San Javier, Murcia, España (lat.37.8 N, long. 0.8 W).

En la **Tabla 5. 5** siguiente se representan los datos obtenidos de Radiación diaria y mensual, Energía total generada y Pérdidas.

La segunda columna de dicha tabla representa la radiación diaria media mensual recibida en el lugar donde se va a realizar el experimento, la tercera columna representa la energía diaria media generada mensual, la última columna representa la energía total generada teórica por los módulos solares, sin pérdidas, la cuarta columna representa la energía obtenida a la salida del generador o cargador y en la quinta columna representa los valores de las pérdidas.

Tabla 5. 5. Datos obtenidos de radiación diaria, mensual y anual del sistema energético solar.

MURCIA	Radiación diaria	Energía diaria	Energía total	Pérdidas totales	Radiación	Energía total
Mes	media mensual; 38°	gen. media mens.	generada	Generador, regulador		generada sin pérdidas
	(kWh/m ² ·día)	(kWh/día)	(kWh)	(kWh)	MJ m ² /día	(kWh)
Enero	5,05	3,41	105,59	23,49	18,18	129,09
Febrero	5,40	3,65	113,01	25,15	19,46	138,16
Marzo	5,76	3,89	120,44	26,80	20,74	147,23
Abril	5,97	4,03	120,80	26,88	21,49	147,68
Mayo	6,32	4,26	132,15	29,40	22,75	161,55
Junio	6,64	4,48	138,84	30,89	23,91	169,73

Julio	6,96	4,69	145,53	32,38	25,06	177,91
Agosto	6,54	4,41	136,75	30,43	23,54	167,17
Septiembre	6,00	4,05	121,41	27,01	21,60	148,42
Octubre	5,36	3,62	112,07	24,94	19,30	137,01
Noviembre	4,42	2,98	89,44	19,90	15,91	109,34
Diciembre	3,94	2,66	82,38	18,33	14,18	100,71
AÑO	5,70	46,11	1.418,40	315,60	246,12	1.734,00

5.8 Pérdidas.

En la **Figura 5.22**, se pueden ver las gráficas de las pérdidas de energía del sistema fotovoltaico, balance entre la generación de energía fotovoltaica neta y las pérdidas en el propio generador, los reguladores de carga, cableado, etc. Gráficas de barras obtenidas de las columnas cuarta y quinta de la **Tabla 5. 5**.

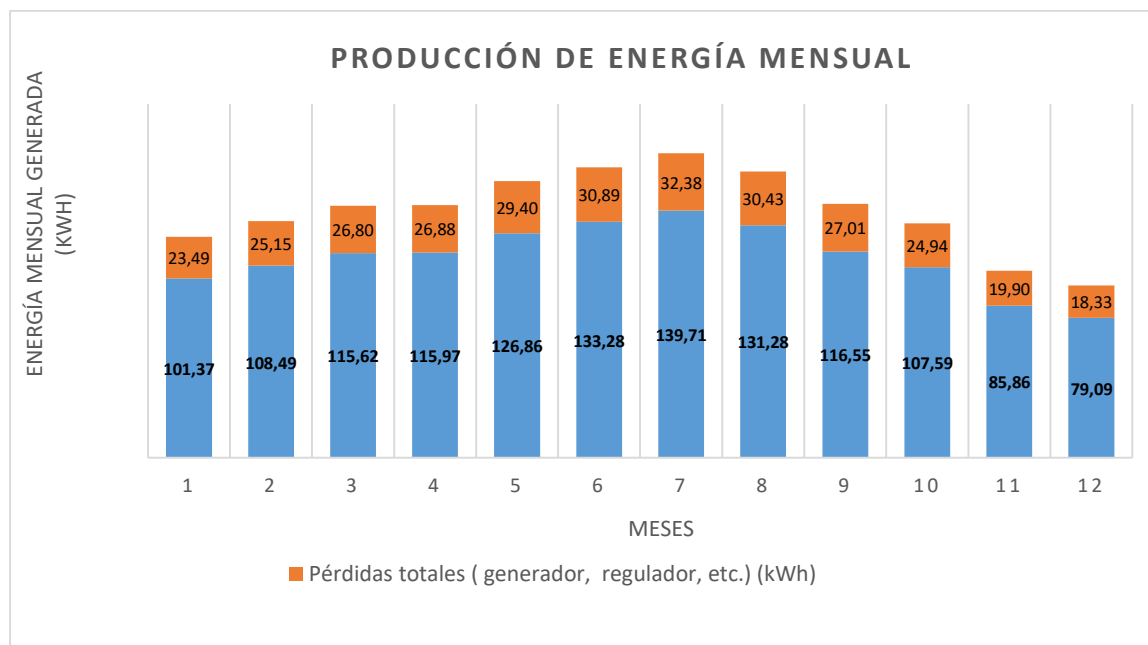


Figura 5.22: Gráfica con la producción y pérdidas.

5.9 Balance energético total.

Los resultados de las simulaciones del balance energético, se pueden ver en las gráficas de la **Figura 5.23**: en (a) la generación de energía para cada mes del año y en (b) la relación de rendimiento (PR).

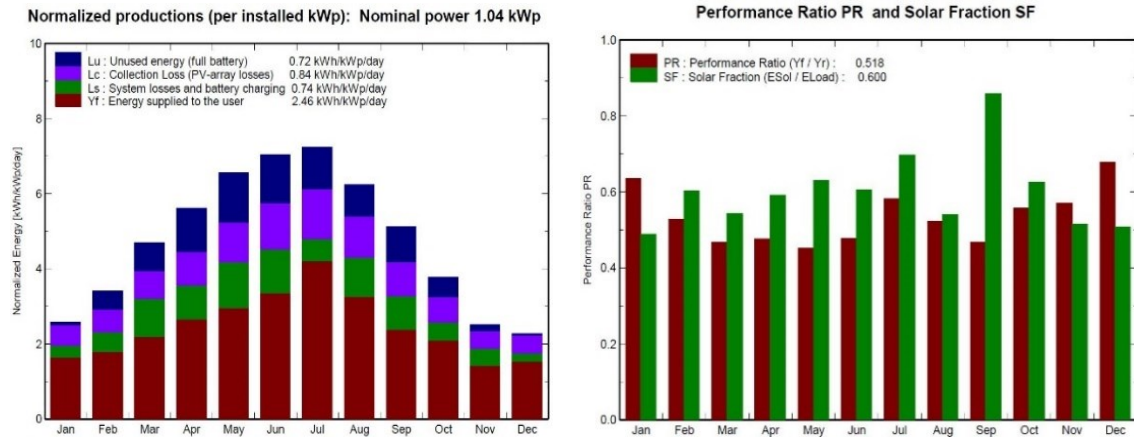


Figura 5.23: Gráficas de producción y PR.

En la **Figura 5.24**, se puede ver en el diagrama de Sankey el balance energético simulado, se puede ver la generación de energía fotovoltaica neta y la demanda total.

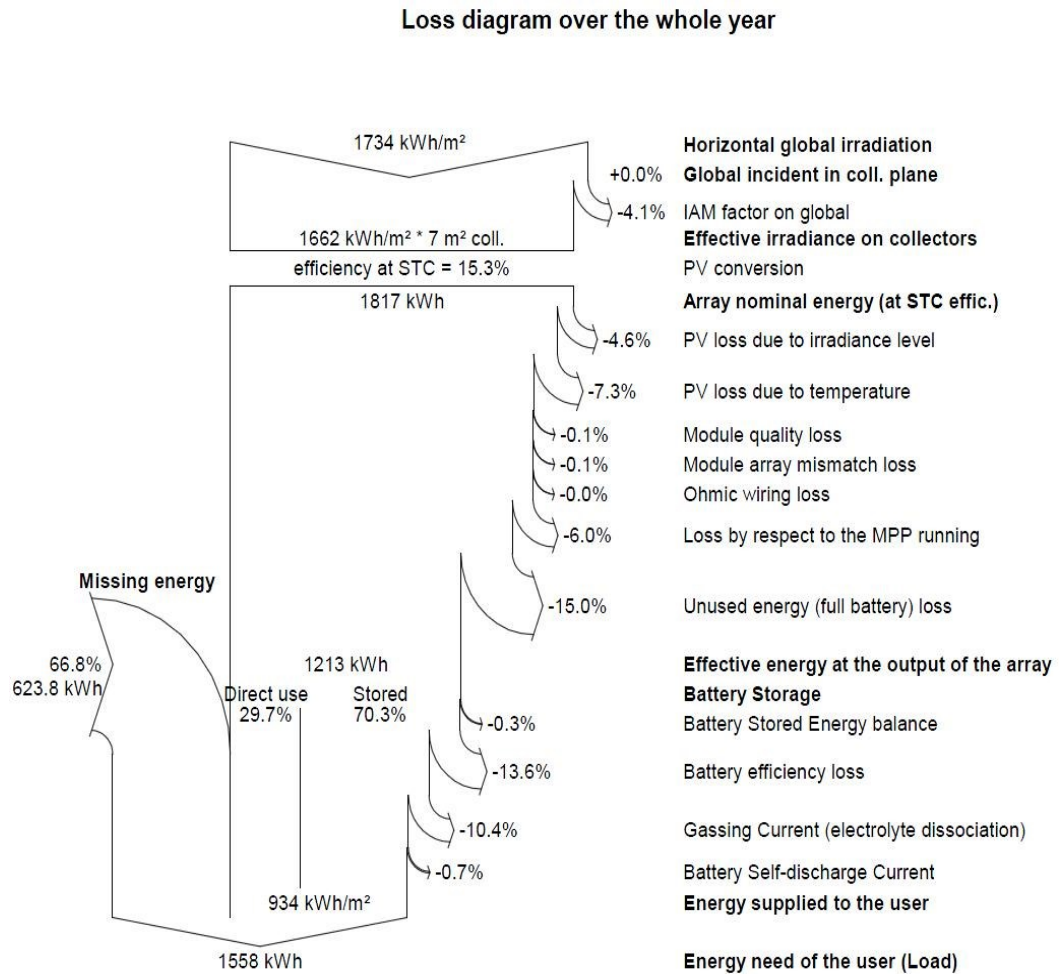


Figura 5.24: Diagrama de Sankey obtenido.

5.10 Conclusiones.

De los resultados realizados en la simulación se puede decir que el sistema generador formado por 8 módulos solares fotovoltaicos cumple el propósito para el que ha sido diseñado, proporciona la energía eléctrica necesaria para recargar las baterías siempre y cuando el ASV-Boya eche el ancla, parando todos sus sistemas de gran consumo, quedando en stand-by.

De los gráficos obtenidos en la **Figura 5.23**, se observa en a) que la generación obtenida es importante sobre todo en los meses de mayo, junio, julio y agosto, sin embargo, en los meses desde enero a marzo y desde octubre a diciembre la generación es bastante baja, debido al poco número de horas solares de la zona, por lo tanto, se obtienen menos kWh/día.

En la gráfica b) se obtiene el Performance Ratio PR que es de 0,518 y la Fracción Solar de 0,600, debido, sobre todo, a que los módulos solares están colocados de manera horizontal sobre el techo del ASV-Boya, por lo que la radiación recibida es menor que si se colocasen con una inclinación de unos 30 ° y orientados al Sur, que sería lo óptimo.

También en la **Tabla 5. 5**, se puede ver que en enero se obtienen 3,41 kWh/día, en febrero 3,65 kWh/día, en marzo 3,89 kWh/día, en octubre 3,62 kWh/día, en noviembre 2,98 kWh/día y en diciembre 2,66 kWh/día, que contrastan con los 4,48 kWh/día obtenidos en junio y los 4,69 kWh/día obtenidos en julio, la diferencia es notable, sin embargo, en estos meses de baja generación, si se realizan experimentos, los tiempos de recarga serán más prolongados, pero la embarcación podrá realizar misiones igualmente.

En la gráfica de la **Figura 5.22** podemos apreciar la generación obtenida, barras de color azul y las pérdidas superpuestas barras de color naranja, que estas llegan a ser del 27,33 %, debido a los propios módulos solares, al cableado eléctrico, al regulador de carga, etc., pérdidas en forma de calor. En total según los valores de la **Tabla 5. 5**, las pérdidas son de 315,60 kWh/año y la energía útil obtenida es de 1.418,40 kWh/año.

Esta energía útil obtenida se puede apreciar ahora en el diagrama de Sankey de la **Figura 5.24** que al ser gestionada dentro del ASV-Boya, entre las cargas y descargas de las baterías y la eficiencia de las mismas, la energía que se utiliza por los sistemas propulsores es de 934 kWh/año.

La energía restante son pérdidas por eficiencia de los equipos utilizados en el sistema, tal como se aprecia en el diagrama.

Se ha podido verificar que la Arquitectura de Control propuesta en el capítulo 3, simulada en el capítulo 4, se ha implementado en software de manera correcta y en el hardware disponible del ASV-Boya.

En el siguiente capítulo se va a exponer la realización de un experimento realizado en la laguna costera del Mar Menor, utilizando el ASV-Boya, con todos sus equipos funcionando a pleno rendimiento en el mes de julio de 2018.

Capítulo 6 Pruebas experimentales y análisis de resultados

6.1 Introducción.

En este capítulo se describe en detalle una misión que se ha realizado de 10 días de duración, en el Mar Menor, para probar la Arquitectura de Control presentada en el capítulo 3 y simulada en el capítulo 4, el sistema energético presentado en el capítulo 5, la autonomía y las operaciones a largo plazo del ASV-Boya.

El objetivo de este experimento es:

- 1- Verificar el sistema de control de la embarcación de comportamiento híbrido boya-embarcación autónoma (ASV-Boya), que sea capaz de convertirse en una boya, anclándose al fondo del mar o moverse y navegar como un vehículo marino autónomo de superficie, a la vez que toma muestras de los parámetros físico-químicos del agua y del entorno.
- 2- Comprobar que la arquitectura de control toma decisiones de forma autónoma, que mediante los sensores que lleva, vaya obteniendo la información del entorno por el que navega y mediante el estudio de esta información le permita a la embarcación híbrida ASV-Boya disponer de cierta inteligencia y capacidad de tomar decisiones, y así poder navegar de forma autónoma gestionando su energía y las comunicaciones de forma indefinida.
- 3- Utilizar la estrategia de navegación autónoma, como la descrita en el capítulo 4, con gestión de la energía óptima para que la ASV-Boya pueda realizar diferentes comportamientos como desplegar y recoger un ancla, para convertirse en una boya o ASV, modificar su velocidad y dirección, tener todos sus dispositivos en pleno funcionamiento.
- 4- Confirmar la propuesta de una estrategia de clasificación de zonas georreferenciadas de exploración, que faciliten la toma de decisiones, en la viabilidad de la ruta de exploración. Utilizando la división de la zona de exploración (Mar Menor) en cuadrículas (casillas) georreferenciadas, como las propuestas en el apartado 2.5, del capítulo 4, estableciendo una base de datos de las coordenadas de cada zona, al objeto de tener claramente diferenciados y ordenados los valores de los parámetros físico-químicos de cada zona, cuando se realizan las exploraciones.
- 5- Inspeccionar la laguna costera del Mar Menor y monitorear los valores físico-químicos del agua, para llevar a cabo las exploraciones con la mayor precisión y garantías, para verificar que el sistema de control de toma de decisiones elige la zona más interesante a explorar, según el nivel de contaminación, necesidad, etc.

El primer paso para explorar adecuadamente el Mar Menor fue definir un mapa de cuadrículas, dividiendo el área completa en 182 casillas de 1 km x 1 km (ver **Figura 6.1**), usando el mapa topográfico nacional: Hoja 955 Torre-Pacheco, Hoja 956 San Javier y Hoja 978 Llano del Beal, escala 1:50.000. Las casillas fueron georreferenciadas por GPS o coordenadas geográficas almacenadas en la base de datos del ASV-Boya.

Los datos de las misiones de exploración previas (archivo histórico) también se mantuvieron, incluidos todos los parámetros medidos por los sensores a bordo u otras fuentes de información, como boyas o recolección manual de datos, se pueden ver en la **Tabla 6.1**. Estos parámetros incluyeron información ambiental, física, química y biológica (contaminación por nitrato y fosfato), turbidez, acidez, densidad del agua, oxígeno, partículas suspendidas, etc.

Tabla 6.1. Valores obtenidos de los parámetros físico-químicos, de cada una de las casillas estudiadas, que se han introducido al Sistema difuso “Fusión Sensores”.

Casillas	Temperatura (°C)	Salinidad (g/L)	Densidad (σ_t /L)	Oxígeno (mg/L)	Clorofila (μ g/L)	Nitratos (mg/L)
5	22,4835	49,0195	1,0540	5,4330	0,5105	1,1015
6	20,7777	51,0362	1,0530	5,1375	0,5114	1,2273
13	20,9684	53,1196	1,0490	5,2736	0,5132	1,2144
20	22,6352	49,0289	1,0560	5,0424	0,5411	1,2162
21	18,8632	51,0328	1,0540	5,2084	0,5333	1,1416
31	19,0711	49,0180	1,0560	5,3628	0,5355	1,1016
32	19,1259	50,0543	1,0580	5,2615	0,5470	1,2461
43	21,2002	51,0443	1,0520	5,4930	3,5000	1,1382
46	19,0185	53,0573	1,0540	5,4926	0,5458	1,1456
62	19,3561	52,0076	1,0500	5,1636	0,5485	1,2070
69	19,0670	53,1659	1,0500	5,3583	0,5021	1,2333
86	19,2264	53,1315	1,0570	5,4432	0,5373	1,1327
89	19,9975	55,1828	1,0560	5,0772	0,5052	1,2146
102	19,9538	49,0828	1,0490	5,2773	0,5400	1,2391
106	19,3400	54,0481	1,0520	5,0703	0,5119	1,2199
107	18,5235	50,0737	1,0570	5,3765	0,5223	1,1049
122	19,6219	52,0323	1,0550	5,1491	0,5018	1,2129
123	19,8125	54,0197	1,0580	5,0279	0,5481	1,1134
127	22,8114	55,0032	1,0520	5,4420	0,5361	1,2094
128	19,1966	49,1596	1,0540	5,2283	0,5090	1,1068
144	18,2834	54,1230	1,0600	5,4132	0,5059	1,2406
145	19,3645	50,1542	1,0510	5,3254	0,5237	1,1027
163	22,4631	55,1280	1,0590	5,0148	0,5248	1,2475
166	18,2381	51,0717	1,0570	5,4753	0,5216	1,1108
167	18,8553	50,1209	1,0520	5,0224	0,5228	1,1463

Todos los conjuntos de parámetros se etiquetaron con su ubicación geográfica, fecha y hora de adquisición.

Esta información previa al experimento esta guardada en el módulo “Gestor de Misión”, para que el “Planificador Misión” reciba los valores de la distancia a otras casillas y las fechas de cuando se realizaron las exploraciones o toma de datos.

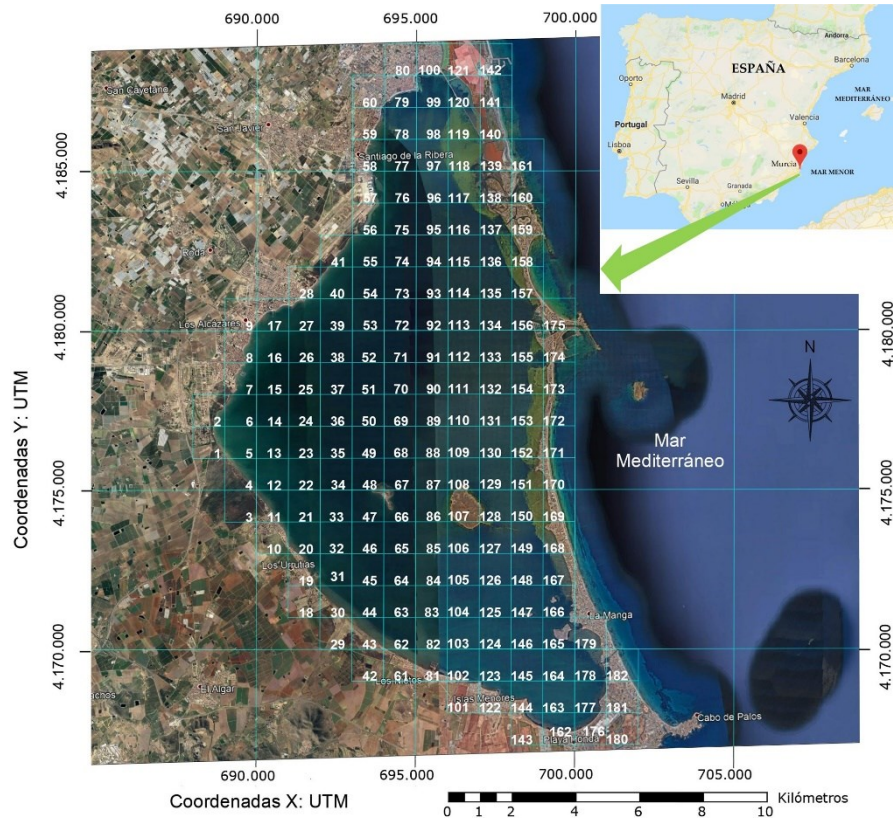


Figura 6.1: División en casillas de 1 km de lado y Coordenadas UTM de situación del Mar Menor, estando numeradas desde la 1 hasta la 182.

La prueba comenzó el 20 de julio de 2018 a las 8:00 de la mañana y acabo el 30 de julio de 2018 a las 21:00. Antes de comenzar el experimento, los diferentes sistemas se verificaron de la siguiente manera: energía de las baterías, recarga fotovoltaica, prueba manual de las hélices, despliegue del timón y del ancla, módulo de autodiagnóstico del sistema de control mediante el sistema de monitoreo remoto IUNO, verificación de sensores y dispositivos (GPS, sonda multiparamétrica, sonar de exploración, etc.), y comunicaciones entre el barco y la estación base.

El programa del “Planificador Misión” usó la información almacenada en la “Base Datos” del equipo para clasificar el estado de cada casilla mediante el módulo “Fusión Sensores”, para ello, cuenta con un algoritmo difuso, cuyo aporte son los valores promedio almacenados de las variables de temperatura, salinidad, turbidez, oxígeno, clorofila y nitratos en cada una, implementado en Simulink/Matlab en el módulo “Gestor Estratégico”, descrito en el capítulo

4. e implementado en el bloque del Software “Algoritmo de toma de decisiones estratégica” (CPU_AlgoritmoEstratégico).

Sobre la base de esta información, las casillas se clasificaron con el color específico de un estado difuso.

El ASV-Boya se lanzó con las baterías completamente cargadas en la casilla 102 (coordenadas UTM: X: 696.000, Y: 4.170.000), cerca del Club de Yates de Los Nietos (ver **Figura 6.1**). La base de datos para los algoritmos de toma de decisiones se cargó con datos previamente adquiridos de las casillas de exploración.

Los valores obtenidos por la sonda multiparamétrica de esta casilla se muestran en la **Tabla 6.2**.

Tabla 6.2. Valores promedio de los parámetros en la casilla 102.

Data	Average Value
Temperature	21.75 °C
Salinity	42.25 P.S.U
Density	0.12 mg/L
Oxygen	6.84 mg/L
Chlorophyll	2.28 µg/L
Nitrates	0.98 mg N-NO3-/L

La ruta de exploración siguió líneas paralelas separadas por 100 m en toda la longitud de la cuadrícula como se muestra en la interfaz de IUNO en la **Figura 6.2**.

Para realizar la navegación y exploración de las casillas el ASV-Boya ha utilizado el módulo implementado en el Software “IUNO Fuzzy controlador de navegación principal” (sbRIO_IUNOfuzzyControladorPrincipal), con todos sus bloques.

Durante el viaje, se tomaron imágenes sonariales, videos de este sitio y parámetros de agua grabados mediante el bloque implementado en el Software “Adquisición de video” (CPU_Cámara) y mediante el bloque “Sonda Multiparamétrica” (N3_SondaMultip).

La inspección de la caja 102 terminó a las 11:00 a.m., con un consumo de energía de 2.5 kWh. Estos datos se almacenaron en el módulo “Gestor de BD” junto con la marca de tiempo correspondiente, lo que puede influir en la decisión sobre la siguiente casilla para visitar.

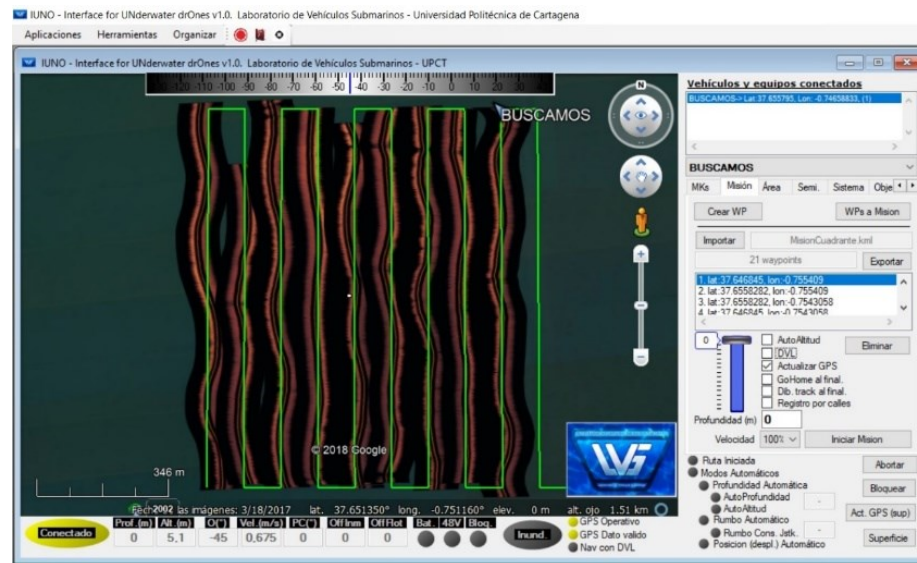


Figura 6.2: Exploración de la casilla 102 realizada en trazos de idas y venidas. Representación en el HMI de IUNO [55].

Teniendo solo datos actualizados de unas pocas áreas cercanas (casillas verdes alrededor de 102), el criterio de gran peso en la toma de decisiones fue la proximidad de zonas contiguas.

La embarcación continuó la inspección de la misma manera y con el mismo tipo de muestreo de las casillas 123 (coordenadas UTM: X: 697,000, Y: 4,170,000) y la casilla 145 (coordenadas UTM: X: 698,000; Y: 4,170,000).

La casilla 123 se completó a las 16:00 h, con un consumo de energía de 3.8 kWh. El mayor consumo de energía se debió principalmente al cambio de rumbo y a un fuerte viento.

Habiendo completado el 52 % de la inspección de la casilla 145 a las 19:00, se simuló una alerta de nitratos en la casilla 31 en el sistema IUNO en la estación base.

Para realizar las simulaciones, los valores de los parámetros ambientales, físicos, químicos y biológicos de las 182 casillas se tomaron de una recopilación de datos manual anterior en algunas áreas representativas y se extrapolaron a las otras casillas.

Los valores anómalos de la casilla 31 se agregaron manualmente solo para fines de simulación.

Los valores de la **Tabla 6.1** se ingresan en el módulo “Fusión Sensores” para obtener el estado de cada casilla. El valor de cada sensor en cada casilla se calcula como la media de todas las lecturas en esa casilla (1 km²) para evitar que una sola medición defina su valor.

Los colores de estado de las casillas se pueden ver en la **Figura 6.3**.

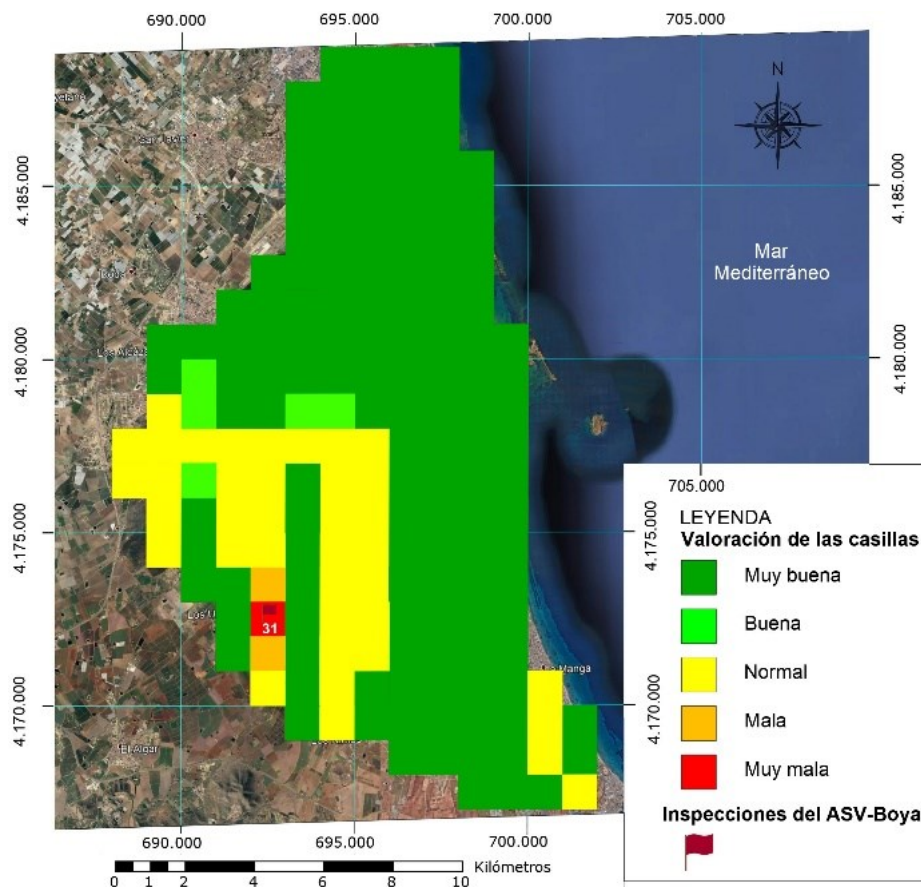


Figura 6.3: Mapa de Colores del Mar Menor que representa el estado de cada casilla, según los valores medios de los parámetros físico-químicos obtenidos de los 6 sensores del ASV-Boya, se aprecia el nivel elevado de los Nitratos en la casilla número 31, en color rojo.

Antes de este evento, el barco se dirigía a la casilla 31, ver **Figura 6.4**, ya que los algoritmos de toma de decisiones del módulo “Planificador Estratégico” la habían seleccionado para monitorearla a continuación.



Figura 6.4: Trayectoria a seguir para que el ASV-Boya navegue de la casilla 145 a la 31.

Después de recorrer 4 km y consumir 4,7 kWh, el barco se detuvo porque la carga de la batería estaba por debajo del 20 %. Los algoritmos del módulo “Coordinador y Gestor Energético” del

Submodelo “Gestor de Ejecución” implementado en el bloque del Software “Gestor de energía de cargas” (N3_GestorEnergíaCargas), decidieron que la mejor estrategia era cambiar al modo de solo recarga y anclar durante la noche a 1,85 km de la casilla 31.

El ASV-Boya permaneció anclado para recargar por encima del 75 % (8.917 Wh) hasta las 3:00 p.m. del 23 de julio y luego continuó a la casilla 31, utilizando 1.0 kWh.

La exploración de la casilla 31 comenzó a las 16.00 h y terminó a las 20:00 h, después comenzó a explorar la casilla 32, donde a las 9:00 p.m. puso el ancla para una estancia de una noche. A las 7:00 a.m. del 24 de julio, se reanudó la exploración de la casilla 32, pero se detuvo nuevamente a las 11:00 a.m., cuando se recibió otra alerta simulada de la casilla 5 (coordenadas UTM: X: 690.000; Y: 4.176.000).

El valor anómalo de la Clorofila de la casilla 5 que se agregó manualmente sólo para fines de simulación.

Esta área susceptible se encuentra en la desembocadura de la Rambla del Albuñón y, de hecho, debe ser monitoreada permanentemente por una boya fija, ya que es un área de descarga crítica conocida, ver **Figura 6.5**, los algoritmos de toma de decisiones la han seleccionado para monitorearla a continuación y por lo tanto, la embarcación procede a navegar de la casilla 32 a la casilla 5 en línea recta o por el camino más corto.



Figura 6.5: Mapa de Colores del Mar Menor, se aprecia el nivel elevado de la Clorofila en la casilla número 5, en color rojo y trayectoria a seguir por el ASV-Boya.

El ASV viajó 1 km hasta esa casilla hasta que las baterías alcanzaron el 20 % y entraron en el modo de recarga en las coordenadas UTM X: 691.284; Y: 4.174.708, donde permaneció hasta el 26 de julio, cuando la carga subió por encima del 75 %.

Luego, recorrió 1.83 km hasta la casilla 5, y comenzó una inspección, a continuación puso el ancla para una estancia de una noche a las 21:00h. hasta las 7:00 am. el 27 de julio, la ASV reanudó la exploración de la casilla 5, que finalizó a las 8:00 a.m., cuando recibió otra alerta de la casilla 69, procediendo a ir a esa casilla, ver trayectoria en la **Figura 6.6**:

Después de 2 km, el nivel de la batería volvió a caer por debajo del 20 %, cuando entró nuevamente en el modo de recarga en las coordenadas UTM: X: 692.000; Y: 4.177.000.

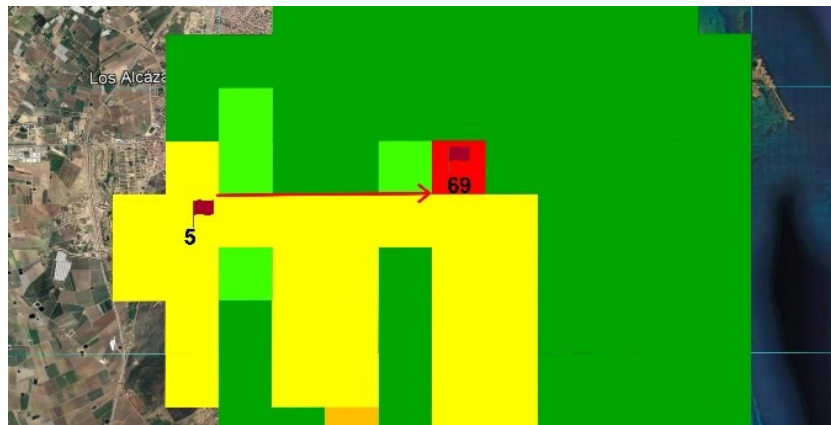


Figura 6.6: Mapa de Colores del Mar Menor, se aprecia la casilla 69 en color rojo por una alerta introducida manualmente en el HMI de IUNO y trayectoria a seguida por el ASV-Boya.

Permaneció aquí hasta dos días después, el 29 de julio, con las baterías por encima del 75 %, se dirigió a la casilla 69, comenzando la exploración a las 16:00 h, y finalizó a las 9:00 p.m. y entrando en modo de espera.

A las 7:00 a.m. del 30 de julio, comenzó a explorar la casilla 89 hasta el final del experimento a las 21:00 h.

Las trayectorias del resultado de la misión de haber estado navegando y explorando de forma autónoma, durante 10 días, en el Mar Menor, se muestra el curso seguido en la **Figura 6.7**.

Las casillas de destino están marcadas con banderas rojas, donde se aprecia el inicio de la misión en la casilla 102, después explora la casilla 123, a continuación, la casilla 145, trayectoria seguida para navegar a la casilla 31 por la llamada de una alarma.

Posteriormente se dirige a la casilla 32, nueva alarma de la casilla 5, otra alarma esta vez de forma manual de la casilla 69 y finalmente explora la casilla 89.

De los resultados obtenidos podemos confeccionar un gráfico del balance energético, que se puede ver en la **Figura 6.8**, que además del consumo de ASV-Boya (línea naranja, en Wh) muestra la potencia generada por el sistema fotovoltaico (línea azul, en W), la energía presente en las baterías (línea verde, Wh), los tiempos en los que el ASV-Boya navega, y cuando se suelta el ancla para pernoctar durante la noche.

Hay que tener en cuenta que, aunque las unidades son diferentes, la escala es la misma para las curvas. El símbolo del ancla blanca representa una parada para recargar las baterías, un ancla negra significa una parada durante la noche, y la hélice muestra la hora en que el barco se pone en marcha.

Las líneas discontinuas horizontales representan la carga mínima de la batería para anclar el barco (en rojo, 20 %), y la carga mínima para ponerse en marcha (en verde, 75 %).

Las diferentes líneas y de la gráfica expresan la siguiente información:

La línea naranja representa los consumos energéticos del ASV-Boya, en Wh, se puede ver que los mayores consumos se producen al navegar de una casilla a otra y cuando la generación de energía es más baja, bien por las mañanas o por las tardes.

La línea azul expresa la generación de energía solar proveniente de los módulos solares fotovoltaicos en W, se puede apreciar que se obtiene energía a primera hora de la mañana, con la salida del sol, llega a su máxima generación al medio día solar con unos 600 W y va disminuyendo a lo largo de la tarde hasta el crepúsculo y puesta de sol, durante los 10 días de este experimento ha habido un buen clima, algo de aire y sin nubes.

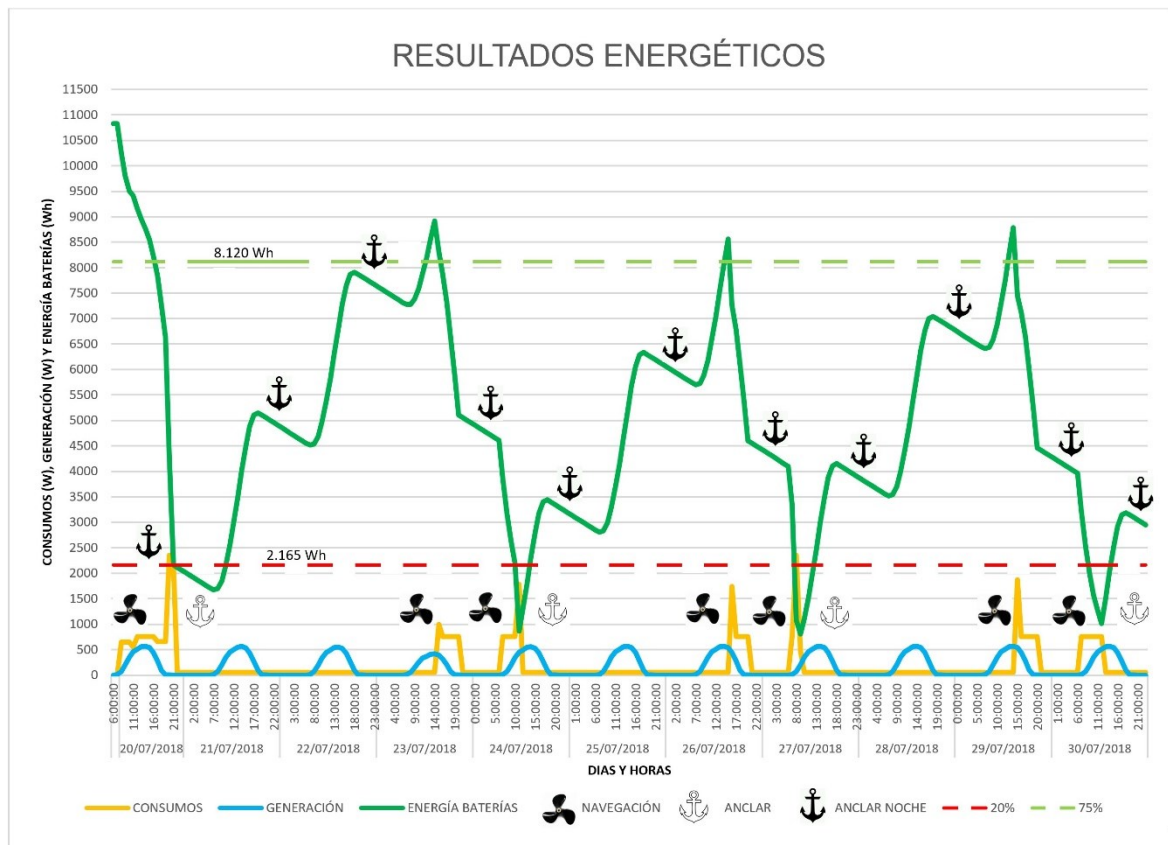


Figura 6.8: Generación y consumo de energía durante el experimento de navegación autónoma de 10 días. Aunque la escala de todos los tiempos son los mismos, las unidades son diferentes: Vatios para el consumo y la generación y Vatios/hora para la energía de las baterías.

La línea verde representa la energía presente en las baterías en Wh, se aprecia que al inicio de la misión las baterías están al 100 % de su carga, después de una jornada de navegación, baja la carga por debajo del 20 %, donde la embarcación queda parada y echado el ancla recargándolas con sus módulos solares fotovoltaicos hasta que llega al 75 %, el día 23 de junio, sobre las 14:00 horas, para entonces el ASV-Boya se pone a navegar otra vez, hasta que baja su carga de nuevo por debajo del 20 %, ese ciclo de carga-descarga se repite 3 veces en los 10 días de duración de la misión.

Podemos afirmar que la embarcación puede navegar indefinidamente realizando ciclos de carga-descarga de sus baterías, usando exclusivamente energía solar fotovoltaica.

Utiliza una estrategia de navegación autónoma con gestión de la energía óptima donde el ASV-Boya puede realizar diferentes comportamientos como soltar el ancla para pernoctar o para recargar sus baterías y después recoger el ancla, de esta manera se ha convertido en una boya o

ASV, modifica su velocidad y dirección, teniendo todos sus dispositivos en pleno funcionamiento.

Se puede confirmar la propuesta de la estrategia de clasificación de zonas georreferenciadas de exploración, que facilitan la toma de decisiones, en la viabilidad de la ruta de exploración. Utilizando la división de la zona de exploración (Mar Menor) en casillas georreferenciadas, estableciendo una base de datos de las coordenadas de cada zona, al objeto de tener claramente diferenciados y ordenados los valores de los parámetros físico-químicos de cada casilla, cuando se han realizado las exploraciones.

Se ha inspeccionado una zona de la laguna costera del Mar Menor y monitoreado los valores físico-químicos del agua, para llevar a cabo las exploraciones con la mayor precisión y garantías, se ha verificado que el sistema de control de toma de decisiones elige la zona más interesante a explorar, según el nivel de contaminación, necesidad, etc.

En el siguiente capítulo se exponen las conclusiones de esta tesis doctoral y los trabajos futuros que se pretenden realizar.

Capítulo 7 Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones.

En esta tesis se ha logrado diseñar una arquitectura de control para un vehículo autónomo de superficie ASV, para realizar misiones de larga duración, para optimizar la energía de la misión, lo que se ha llamado en esta tesis embarcación ASV-Boya, para monitorizar correctamente los parámetros de la calidad del agua del medio marino.

Se ha podido comprobar como este vehículo se autoabastece con energía solar fotovoltaica y que se le puede incorporar sistemas de detección especializados para medir la calidad del agua. Por eso a este sistema robótico conjunto se le ha llamado observatorio oceanográfico robótico.

Se ha logrado con éxito combinar un vehículo autónomo y una boya fija, cuya energía y autonomía de navegación se gestionan gracias a una arquitectura de software capaz de tomar decisiones de forma inteligente y autónoma.

Se ha conseguido con el trabajo de esta tesis una embarcación altamente especializada y novedosa al tener la capacidad de anclarse al lecho marino y convertirse en una “boyas”, ya sea para tomar medidas en puntos específicos o para recargar sus baterías y navegar explorando una determinada área tomando muestras del entorno, consiguiendo una presencia autónoma permanente en lagos o aguas costeras poco profundas.

Esto mejora la autonomía en el monitoreo de los parámetros de calidad del agua y evita los problemas asociados con el despliegue de un gran número de sistemas de observación marina basados en boyas fijas, que influyen y afectan al tráfico marítimo, al medio ambiente, al turismo y el costo involucrado.

Se ha podido crear una arquitectura de control de tipo híbrida, combinando una capa deliberativa dividida en dos niveles, el Nivel Estratégico y el Nivel Táctico, donde se toman las decisiones y una capa reactiva, el Nivel Operativo, donde se ejecutan los comportamientos reactivos.

Se ha intentado demostrar durante todo este documento, que los objetivos que se planteaban al principio de esta tesis doctoral, se han cumplido y esto viene abalado por el artículo que se ha publicado en la revista SENSORS 2018, con índice de alto impacto (2,475), cuartil de la categoría con JCR (Q1), [\[55\]](#).

La Arquitectura de Control propuesta en esta tesis se ha implementado con éxito en el entorno de programación Matlab y realizados varios modelos mediante Simulink, se ha probado la viabilidad de la misma y la estrategia de control mediante simulaciones.

Se ha verificado que los modelos creados e implementados mediante lógica difusa, cuando se les introduce los datos reales de los sensores almacenados previamente, la arquitectura y las estrategias de control toman las decisiones adecuadas.

Se ha comprobado que se puede crear un mapa codificado por colores para representar los niveles disueltos en el agua de sus parámetros físico-químicos como la salinidad, la temperatura, la clorofila, el oxígeno, etc.

Después de realizadas las simulaciones se ha verificado que los modelos creados en el capítulo 4, son adecuados donde la toma de decisiones y los comportamientos obtenidos han sido correctos, como “Ir de A a B”, de “Exploración” o el de “Echar Ancla”.

Se ha podido verificar que la Arquitectura de Control propuesta en el capítulo 3 y simulada en el capítulo 4, se ha implementado con éxito en el software de manera correcta y en el hardware disponible del ASV-Boya.

De los resultados obtenidos en la simulación, se puede afirmar que el sistema generador formado por módulos solares fotovoltaicos, cumple con el propósito para el que ha sido diseñado, proporcionando la energía eléctrica suficiente para recargar las baterías.

También se verifica que después de descontar las pérdidas energéticas, la energía útil final obtenida, es suficiente para propulsar al ASV-Boya y para mantener en funcionamiento a todos sus sistemas eléctricos y electrónicos.

Del experimento realizado se ha podido verificar que el sistema de control de la embarcación hace que se comporte de manera híbrida boyas-embarcación autónoma (ASV-Boya), que es capaz de convertirse en una boyas, que puede anclarse al fondo del mar, que puede moverse y navegar como un vehículo marino autónomo de superficie, a la vez puede tomar muestras de los parámetros físico-químicos del agua y del entorno.

Se ha demostrado con pruebas realizadas en la laguna costera del Mar Menor, que la arquitectura de control diseñada toma decisiones de forma autónoma, que mediante los valores de los sensores que lleva la embarcación, va obteniendo la información del entorno por el que navega y mediante el estudio de esta información, le permite a la embarcación híbrida ASV-Boya disponer de cierta inteligencia y capacidad de tomar decisiones, y así ha podido navegar

de forma autónoma gestionando su energía y las comunicaciones de forma indefinida durante días.

Podemos afirmar que la embarcación puede navegar indefinidamente realizando ciclos de carga-descarga de sus baterías, usando exclusivamente energía solar fotovoltaica.

Se ha probado la estrategia de navegación autónoma gestionando de forma óptima la energía el ASV-Boya, realizando diferentes comportamientos como soltando el ancla para pernoctar y para recargar sus baterías y después ha recogido el ancla, de esta manera se ha convertido en una boya o ASV, también ha podido modificar su velocidad y dirección, teniendo todos sus dispositivos en pleno funcionamiento.

Se puede confirmar la propuesta de la estrategia de clasificación de zonas georreferenciadas de exploración, que han facilitado la toma de decisiones, en la viabilidad de la ruta de exploración. Utilizando la división de la zona de exploración (Mar Menor) en casillas georreferenciadas, se ha establecido una base de datos de las coordenadas de cada zona, de esta manera se tiene claramente diferenciados y ordenados los valores de los parámetros físico-químicos de cada casilla, cuando se han realizado las exploraciones.

Se ha inspeccionado con éxito una zona de la laguna costera del Mar Menor y monitoreado los valores físico-químicos del agua, se han llevado a cabo las exploraciones con bastante precisión y garantías, se ha verificado que el sistema de control de toma de decisiones elige la zona más interesante a explorar, según el nivel de contaminación, necesidad, etc.

7.2 Aportaciones de esta tesis.

En opinión del autor, con esta tesis se han cumplido los objetivos propuestos en el capítulo primero, matizándose algunos aspectos y apareciendo algunas novedades según la tesis ha ido progresando hasta su terminación.

Las aportaciones principales de esta tesis son:

- **La arquitectura de control para un vehículo autónomo de superficie ASV**, con la capacidad de tomar decisiones para que pueda realizar misiones de larga duración, para navegar en aguas someras, consiguiendo un comportamiento híbrido ASV-Boya, para monitorizar correctamente los parámetros de la calidad del agua del medio marino.

- **Una embarcación altamente especializada y novedosa** al combinar un vehículo autónomo y una boya fija, y tener la capacidad de anclarse al lecho marino en aguas poco profundas.
- **Un sistema generador formado por módulos solares fotovoltaicos**, que proporciona la energía eléctrica suficiente para que la embarcación pueda navegar indefinidamente, realizando ciclos de carga-descarga de sus baterías, usando exclusivamente energía solar fotovoltaica.
- **Una estrategia de clasificación de zonas georreferenciadas de exploración, dividiendo la zona del (Mar Menor) en casillas**, establecido una base de datos de las coordenadas de cada zona, de esta manera se tiene claramente diferenciados y ordenados los valores de los parámetros físico-químicos de cada casilla.

Otras aportaciones de esta tesis son:

- **Un estudio exhaustivo del estado de la técnica** en dispositivos marinos para el monitoreo de los parámetros físico-químicos del agua, como los sistemas basados en boyas, los robots o drones marinos, como los vehículos operados a distancia (ROV) y los vehículos autónomos de superficie (ASV).
- **Un conjunto de modelos, bloques y módulos implementados** en el entorno de programación Matlab/Simulink.
- **Modelos creados e implementados mediante lógica difusa**, que permiten a la arquitectura de control la toma de decisiones.
- **La divulgación de resultados** que se detalla en la siguiente sección.

Divulgación de resultados:

Como resultado de la investigación realizada en el entorno de la tesis y para divulgación de la misma se ha publicado un libro, varios artículos y congresos:

- **Solicitud de patente**

2021

Inocencio González Reolid, Carlos González Espín. Título “Marco perimetral soporte para refrigeración de los paneles solares”. Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), solicitud número 202130092, Madrid, 8 de febrero 2021.

- Libro publicado**2016**

Inocencio González R.: Título “Vehículo Solar Autónomo para Crear Algoritmos de Gestión de Energía”. Sector Vehículos Solares Autónomos. Editorial Publicia, ISBN: 978-3-639-55743-5, 2016.

- Póster en congresos**2019**

I. González, J.C. Molina, F. Ortiz, A. Guerrero, D. Alonso. Observatorio robótico marino autónomo con energía solar para el monitoreo permanente de grandes áreas de agua poco profundas, caso de estudio: Mar Menor. V Jornadas Doctorales Universidad de Murcia y de la Universidad Politécnica de Cartagena, 29-30-31 mayo 2019, Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Murcia, Campus Mare Nostrum.

- Ponencias en congresos**2012**

A. Guerrero, I. González, V. Moreno, N. Gómez, J. García. Underwater Vehicles Laboratory (UVL), System Engineering and Automation, Chemistry and Environmental Engineering, Ships and Seas Technology. Technical University of Cartagena (UPCT), Cartagena, Spain. “Design of the Power System of a Solar Autonomous Surface Vehicle for Underwater Inspection Works”. Campus Mare Nostrum, Cartagena, 18 april 2012.

2012

A. Guerrero, F. García, I. González. Laboratorio de Vehículos Submarinos, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España. “Vehículo Solar Autónomo de Arquitectura Electrónica Abierta para el Desarrollo de Algoritmos de Gestión de Energía”. Jornadas de Computación Embebida. Jornadas Sarteco. Universidad Miguel Hernández, Elche, España. Junio-septiembre 2012.

2012

A. Guerrero, T. López, J. Gilabert, J. García-Vidal, A. Zamora, I. González. Laboratorio de Vehículos Submarinos, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España. “Vehículo Submarino para trabajos oceanográficos en aguas costeras”. Jornadas de Computación Embebida. Jornadas Sarteco. Universidad Miguel Hernández, Elche, España. Junio-septiembre 2012.

2019

I. González. Mesa redonda “RED CEIMARNET y Acuicultura”, participación como representante por Campus Mare Nostrum, por parte de la Universidad Politécnica de Cartagena, XVII Congreso Nacional de Acuicultura, Sociedad Española de Acuicultura (SEA). Facultad de Biología de la Universidad de Murcia. Cartagena, 7 al 10 de mayo 2019.

- Artículos en revistas**2012**

A. Guerrero, F. García, I. González, N. Gómez. Underwater Vehicles Laboratory (UVL), Technical University of Cartagena (UPCT), Cartagena, 30203, Spain. “A Biologically Inspired Neural Network for Solar Powered Autonomous Surface Vehicles”. American Journal of Intelligent Systems. Vol.2, No.4, August 2012.

2013

I. González, A. Guerrero. Laboratorio de Vehículos Submarinos, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España. “Vehículo Solar Autónomo para el desarrollo de algoritmos de generación de trayectorias optimizados energéticamente”. VI Jornada de Introducción a la Investigación de la UPCT, Asociación de Jóvenes Investigadores de Cartagena (AJICT) febrero de 2013.

2013

I. González, “Puesta a Tierra de los Módulos Fotovoltaicos”. Revista especializada en el sector de la energía solar, SOLARNEWS, nº 44, páginas 44-51, febrero de 2013.

2013

I. González, “Compensación de Huecos de Tensión en Plantas Fotovoltaicas”. Revista especializada en el sector de la energía solar, SOLARNEWS, nº 45, páginas 24-31, abril de 2013.

2014

I. González, “Toma de decisión en instalación solar fotovoltaica”. Revista especializada en el sector de la energía solar, SOLARNEWS, nº 51, páginas 28-32, mayo de 2014.

2014

I. González, A. Guerrero, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España. “Arquitectura de Control para Vehículos Solares Tripulados Basada en Métodos de Toma de Decisiones”. VII Jornada de Introducción a la Investigación de la UPCT, Asociación de Jóvenes Investigadores de Cartagena (AJICT), marzo-mayo de 2014.

2018**[55]**

Listada en JCR e índice de impacto Q1.

I. González-Reolid, J. Carlos Molina-Molina, A. Guerrero-González, F. J. Ortiz. And D. Alonso” An Autonomous Solar Powered Marine Robotic Observatory for Permanent Monitoring of Large Areas of Shallow Water”. Dep of Automation and Systems Engineering. DSIE Research Group. Technical University of Cartagena. Plaza del Hospital 1, 30202, Cartagena, Murcia, Spain. MDPI, October, Sensors 2018, 18, 3497.

7.3 Trabajos y líneas de investigación futuras.

Como una línea de investigación futura se propone desplegar más vehículos para reducir el tiempo de exploración del Mar Menor. El número de vehículos depende del tiempo máximo permitido para el almacenamiento de los datos recopilados y el presupuesto disponible.

Por ejemplo, se estima que 3 ASV-Boya podrían cubrir toda el área del Mar Menor de 3 a 4 meses.

Con respecto al trabajo futuro:

A corto plazo

- (i) realizar misiones de monitoreo más largas para mejorar la eficiencia de la captura solar del sistema fotovoltaico y mejorar la capacidad de las baterías.
- (ii) llevar a cabo misiones en otoño y primavera con menos horas de luz diurna y más nubes en áreas menos favorables.
- (iii) administrar los períodos de recarga mediante nuevos algoritmos para iniciar la actividad del vehículo con niveles de potencia más bajos.

A medio y largo plazo

- (i) introducir nuevas fuentes de energía renovable, como turbinas eólicas.
- (ii) automatizar el procesamiento posterior de los datos utilizando técnicas de big data.
- (iii) almacenar la energía en H₂, mediante disociación del agua con electrolizadores y colocación de una pila de combustible para disponer de más energía para la navegación.

Otra línea de investigación futura que se propone es la utilización de la implementación de la arquitectura de control presentada en esta tesis en robots autónomos terrestres. Con aplicaciones en el análisis y gestión de la limpieza en ciudades, aeropuertos, grandes industrias, centros logísticos, hospitales, etc., ya que permite la toma de decisiones mediante la lectura de datos de diferentes sensores, colocados en lugares adecuados.

Capítulo 8 Referencias

8.1 Referencias.

1. Rubén Moreno González. "Fuentes y Distribución de Microcontaminantes Orgánicos Regulados y Emergentes en la Laguna Costera del Mar Menor", Tesis Doctoral, Departamento de Química Analítica, Facultad de Química, Universidad de Murcia, Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Murcia, Grupo de Contaminación Marina, pp. 43-46, 2015.
2. Causas y consecuencias de la contaminación de mares y océanos. EcologíaVerde. <https://www.ecologiaverde.com/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-de-mares-y-oceanos-1539.html>. (acceso el 20 de mayo de 2019).
3. New Plastics Economy Initiative by the Ellen MacArthur Foundation. Available online: <https://newplasticseconomy.org/> (acceso el 25 de abril de 2019).
4. European Strategy for Plastics by European Commission. Available online: http://ec.europa.eu/environment/waste/plastic_waste.htm (acceso el 25 de abril de 2019).
5. Miguel Ángel Esteve Selma y Julia Martínez Fernández. Eutrofización Litoral por actividad agrícola: El caso del Mar Menor. Universidad de Murcia. Gestión del Agua en el Mediterráneo y Energías renovables (CRPM, Valencia). Conferencia y Grupo de Trabajo de Agua y Energía de la Comisión Intermediterránea (CIM), Valencia, 18, noviembre, 2016.
6. Web de banderas azules. Available online: <http://www.blueflag.global/beaches2/> (acceso el 25 de abril de 2019).
7. Rubén Moreno González, Sara Rodríguez Mozaz, M. Gros, E. Pérez Cánovas, D. Barceló, Víctor Manuel León. "Input of pharmaceuticals through coastal surface watercourses into Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain): Sources and seasonal variations". Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Murcia, Apdo. 22, C/ Varadero 1, San Pedro del Pinatar, 30740 Murcia, Spain. Catalan Institute for Water Research (ICRA), Parc Científic i Tecnològic de la Universitat de Girona, Edifici H2O. Emili Grahit, 101-17003 Girona, Spain. Department of Environmental Chemistry, IDAEA-CSIC, C/Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona, Spain. Elsevier, Science of the Total Environment 490, pp. 59-72, 2014.

8. Javier Lloret, Arnaldo Marin, Lázaro Marin Guirao, “Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change?”. Departamento de Ecología e Hidrología, Universidad de Murcia. 30100-Murcia, Spain. Elsevier, Estuarine Coastal and Shelf Science 78, pp. 403-412, 2008.
9. Lázaro Marín Guirao, Javier Lloret, Arnaldo Marín, Gregorio García, Antonio García Fernández. “Pulse-discharges of mining wastes into a coastal lagoon: Water chemistry and toxicity”. Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología, Universidad de Murcia. 30100-Murcia, Spain. Departamento de Ciencias y Tecnología Agrícola, Universidad Politécnica de Cartagena, 30203-Cartagena, Spain, Departamento de Toxicología, Facultad de Veterinaria, Universidad de Murcia. 30100-Murcia, Spain. Chemistry and Ecology, Vol. 23, No. 3, pp. 217-231, June 2007.
10. Ángel Pérez Ruzafa. Situación del Mar Menor. Una Mirada Global sobre el Mar Menor. VII Jornada Agua y Sostenibilidad. Cátedra del Agua y la Sostenibilidad. Universidad de Murcia. Murcia, 11 de mayo de 2018.
11. Ángel Pérez Ruzafa, Concepción Marcos, Carmen M. Bernal, Victor Quintino, Rosa Freitas, Ana María Rodríguez, Marta García Sánchez, Isabel M. Pérez Ruzafa. “Cymodocea nodosa vs. Caulerpa prolifera: Causes and consequences of a long term history of interaction in macrophyte meadows in the Mar Menor coastal lagoon (Spain, southwestern Mediterranean)”, Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología, Campus Espinardo, Regional Campus of International Excellence “Campus Mare Nostrum”, Universidad de Murcia, 30100 Murcia, Spain Departamento de Biología Vegetal I, Facultad de Biología, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain Department of Biology and CESAM, University of Aveiro, 3810 193 Aveiro, Portugal. Elsevier, Estuarine, Coastal and Shelf Science 110, pp. 101-115, 2012.
12. Laura López Martínez, Andrés Paredes Giménez, Nuria Alcaraz Oliver, Javier Gilaber. Análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos en las aguas costeras de la region de Murcia. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 48, 30203, Cartagena (Murcia), Grupo Investigación “Ecosistemas”. III Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT. Mayo 2010.
13. Albadalejo, C.; Sánchez, P.; Iborra, A.; Soto, F.; López, J.A.; Torres, R. Wireless sensor networks for oceanographic monitoring: A systematic review. *Sensors* 2010, 10, 6948-6968.

14. J. E. Manley, “Unmanned surface vehicles, 15 years of development,” in *OCEANS 2008*, 2008, vol. 2008-Supplement, pp. 1–4.
15. V. Kanakakis, P. Spanoudakis, and N. Tsourveloudis, “Optimized design of an unmanned surface vehicle,” in *ELMAR, 2009. ELMAR '09. International Symposium*, 2009, pp. 181–184.
16. Guerrero, A.; García-Córdoba, F.; Ortiz, F.J.; Alonso, D.; Gilabert, J. A Multirobot Platform Base don Autonomous Surface and Underwater Vehicles with Bio-inspired Neurocontrollers for Long-term Oil Spills Monitoring. *Auton. Robot.* 2016, 40, 1321-1342.
17. Jianhua Wang, Wei Gu, Jianxin Zhu, and Jubiao Zhang, “An Unmanned Surface Vehicle for Multi-mission Applications,” in *Electronic Computer Technology, 2009 International Conference on*, 2009, pp. 358–361.
18. Francisco Vera García; José R. García Cascales; Z. Hernández Guillén y J. P. Delgado Marín. Atlas de Irradiación Solar y Temperatura Ambiente de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Modelado de Sistemas Térmicos y Energéticos. Universidad Politécnica de Cartagena. Campus Muralla del Mar s/n, Cartagena, E-30202. ResearchGate. 2014.
19. Steinberg, M.; Stack, J.; Paluszkiwicz, T. Long duration autonomy for maritime systems: challenges and opportunities. *Auton. Robot.* **2016**, 40, 1119–1122.
20. Albadalejo, C.; Soto, F.; Torres, R.; Jiménez, M.; López-Castejón, F.; Gilabert, J. Design and deployment of a wireless sensor network for the mar menor coastal observation system. *IEEE J. Ocean. Eng.* **2017**, 42, 966–976.
21. Albadalejo, C.; Jiménez, M.; Soto, F.; Torres, R.; López, J.A.; Iborra, A. A System for Monitoring Marine Environments based on Wireless Sensor Networks. ResearchGate. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/Oceans-Spain. 2011.6003584. July **2011**.
22. Albadalejo, C.; Sánchez, P.; Iborra, A.; Soto, F.; López, J.A.; Torres, R. Wireless sensor networks for oceanographic monitoring: A systematic review. *Sensors* **2010**, 10, 6948–6968.
23. Guobao Xu, Weiming Shen and Xianbin Wang. “Applications of Wireless Sensor Networks in Marine Environment Monitoring: A Survey”. Lab of Ocean Remote Sensing & Information Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

- Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Western Ontario, London, Ontario N6A 5B9, Canada. *Sensors* **14**, pp.16932-16954, 2014.
24. Knight, C.; Davidson, J.; Behrens, S. Energy Options for Wireless Sensor Nodes. *Sensors* **2008**, *8*, 8037–8066.
 25. Senda, S.; Parra, L.; Lloret, J.; Jiménez, M. Oceanographic Multisensor Buoy Based on Low Cost Sensors for Posidonia Meadows Monitoring in Mediterranean Sea. *J. Sens.* **2015**, *2015*, 920168.
 26. Alippi, C.; Camplani, R.; Galperti, C.; Roveri, M. A Robust, Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, VOL. 11. NO. 1. January. **2011**, *11*, 45–55.
 27. Albadalejo, C.; Soto, F.; Torres, R.; Sánchez, P.; López, J.A. A Low-Cost Sensor Buoy System for Monitoring Shallow Marine Environments. *Sensors* **2012**, *12*, 9613–9634.
 28. Special Issue on “Long Term Autonomy in Marine Robotics”. *Autonomous Robots*. 2016; Volume 40, No. 7. Available online: <https://link.springer.com/journal/10514/40/7/page/1> (accessed on 10 September 2018).
 29. Palomeras, N.; Carrera, A.; Hurtós, N.; Karras, G.C.; Bechlioulis, C.P.; Cashmore, M.; Magazzeni, D.; Long, D.; Fox, M.; Kyriakopoulos, K.J.; et al. Toward persistent autonomous intervention in a subsea panel. *Auton. Robot.* **2016**, *40*, 1279–1306. doi:10.1007/s10514-015-9511-7.
 30. Carragher, P.; Hime, G.; Legh-Smith, P.; Mayville, J.; Nelson, R.; Pai, S.; Parnum, L.; Shone, P.; Smith, J.; Smith, C. A New Platform for Offshore Exploration and Production. *Oilfield Rev.* **2014**, *25*, 40–50.
 31. Ferri, G.; Cococcioni, M.; Alvarez, A. Mission Planning and Decision Support for Underwater Glider Networks: A Sampling on-Demand Approach. *Sensors* **2016**, *16*, 28.
 32. Servicio de monitoreo del entorno marino de Copernicus. Disponible en la web: <http://marine.copernicus.eu/> (Acceso el 10 de junio de 2019).
 33. Crimmins, D.M.; Patty, C.T.; Beliard, M.A.; Baker, J.; Jalbert, J.C.; Komerska, R.J.; Chappell, S.G.; Blidberg, D.R. Long-Endurance Test Results of the Solar-Powered AUV System. In Proceedings of the OCEANS 2006, Boston, MA, USA, 17–21 September 2006.

-
34. Codiga, D.L. A Marine Autonomous Surface Craft for Long-Duration, Spatially Explicit, Multidisciplinary Water Column Sampling in Coastal and Estuarine Systems. *J. Atmos. Ocean. Technol.* **2015**, 32, 627–641.
 35. Niu, H.; Lu, Y.; Savvaris, A.; Tsourdos, A. Efficient Path Planning Algorithms for Unmanned Surface Vehicle. *IFAC-PapersOnLine* **2016**, 49, 121–126.
 36. Savvaris, A.; Niu, H. Oh. and Tsourdos, A. Development of Collision Avoidance Algorithms for the C-Enduro USV. *19th IFAC World Congress. Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014*.
 37. Dunbabin, M.; Grinham, A.; Udy, J. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring. In Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), Sydney, Australia, 2–4 December 2009.
 38. Giordano, F.; Mattei, G.; Parente, C.; Peluso, F.; Santamaria, R. Integrating Sensors into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters. *Sensors* **2016**, 16, 41.
 39. Giordano, F.; Mattei, G.; Parente, C.; Peluso, F.; Santamaria, R. Microvega (micro vessel for geodetics application): a marine drone for the acquisition of bathymetric data for gis applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5, 2015 Underwater 3D Recording and Modeling, 16–17 April 2015, Piano di Sorrento, Italy.
 40. Dunbabin, M. Autonomous Greenhouse Gas Sampling Using Multiple Robotic Boats. *Field Serv. Robot.* **2016**, 113, 17–30, doi:10.1007/978-3-319-27702-8_2.
 41. Romano, A. y Duranti, P. Autonomous Unmanned Surface Vessels for Hydrographic Measurement and Environmental Monitoring. FIG Working Week 2012. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage Rome, Italy, 6-10 May 2012.
 42. Klinck, H.; Stelzer, R.; Jafarmadar, K. y Mellinger, D. K. AAS Endurance: An autonomous acoustic sailboat for marine mammal research. Cooperative Institute for Marine Resources Studies Oregon State University, Hatfield Marine Science Center 2030 SE Marine Science Drive, Newport, OR 97365, USA. Austrian Society for Innovative Computer Science Kampstraße 15/1, 1200 Vienna, Austria. Center for Computational Intelligence School of Computing at De Montfort University The Gateway, Leicester LE1 9BH, United Kingdom.
-

-
43. Specht, C.; Switalski, E. y Specht, M. application of an autonomous-unmanned survey vessel (asv-usv) in bathymetric measurements. Gdynia Maritime University, Poland. POLISH MARITIME RESEARCH 3 (95) 2017 Vol. 24; pp. 36-44. 10.1515-pomr-2017-0088.
 44. IEEE Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems. International Standard ISO/IEC 42010:2007(E). IEEE Std 1471-2000.
 45. J. L. Poza Luján, J. L. Posadas Yagüe, J. E. Simó Ten. “Revisión de las arquitecturas de control distribuido”. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Automática e Informática Industrial. ResearchGate. V. 1.0, 30 marzo de 2011.
 46. N. J. Nilsson. “Principles of Artificial Intelligence”. Morgan Kaufmann, Ed. Los Altos, C.A. 1980.
 47. R. A. Brooks. “A Robust Layered Control System For A Mobile Robot”. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, No. 1, March 1986.
 48. R. A. Brooks. “Intelligence without representation”. Artificial Intelligence, 47, 1991. pp. 139-159.
 49. R. C. Arkin. “Behavior-Based Robotics”. MIT Press, Cambridge. 1998.
 50. M. Carreras, P. Ridao, R. García, D. Ribas, N. Palomeras. “Inspección visual subacuática mediante robótica submarina”. Universidad de Girona. Instituto de Informática y Aplicaciones, Campus Montilivi, Elsevier, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 9, 17071 Girona, España, 2012, 34-45.
 51. R. Alami, R. Chatila, S. Fleury, M. Ghallab, F. Ingrand: “An Architecture for Autonomy”. LAAS-CNRS. The International Journal of Robotics Research, SAGE Publications, 1998, 17, pp. 315-337. Hal-00123273.
 52. Molina Molina, Juan Carlos; Guerrero Gonzalez, Antonio, “IUNO: Una Plataforma Software para el Control Integrado de Múltiples Vehículos Marinos no Tripulados”, +DESEi+d 2016, IV Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, pag 877-884, 2016.
 53. C.V. Altrock, “Fuzzy Logic and neuro Fuzzy applications explained, Prentice Hall, New York, 1995.
 54. Mamdani, E. H., Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, Academic Press: New York, 1974.
-

55. I. González-Reolid; J. Carlos Molina-Molina; A. Guerrero-González; F.J. Ortiz; D. Alonso. An Autonomous Solar-Powered Marine Robotic Observatory for Permanent Monitoring of Large Areas of Shallow Water. Dep of Automation and Systems Engineering and DSIE Research Group, Universidad Politécnica de Cartagena. Plaza del Hospital 1, 30202 Cartagena, Spain. *Sensors* 18, 3497, 17 October 2018.